corso di
RADIOTECNICA

pubblicazione settimanale - 8 - 15 luglio 1961 - un fascicolo lire 150 41° numero

corso di
RADIOTECNICA

settimanale a carattere culturale

Direzione, Amministrazione, Pubblicità:
Via dei Pellegrini 8/4 - Telef. 593.478
MILANO

Ogni fascicolo — contenente 3 lezioni — costa lire 150, acquistato alle edicole.

Se l'edicola risulta sprovvista, o si teme di rimanere privi di qualche numero, si chieda invio settimanale direttamente al proprio domicilio a mezzo abbonamento.

Il versamento per ricevere i 52 fascicoli costituenti l'intero Corso è di lire 6500 + I.G.E. = lire 6630. A mezzo vaglia postale, assegno bancario, o versamento sul conto corr. postale 3/41.203 del « Corso di RADIOTECNICA » - Via dei Pellegrini 8-4 - Milano.
In ogni caso, scrivere in modo molto chiaro e completo il proprio indirizzo.

L'abbonamento può essere effettuato in qualsiasi momento; si intende comprensivo delle lezioni pubblicate e dà diritto a ricevere tali lezioni, che saranno inviate con unica spedizione.

Estero: abbonamento al Corso, Lit. 8.500. ($ 15). Numeri singoli Lit. 300 ($ 0,50).

Per i cambi di indirizzo durante lo svolgimento del Corso, unire lire 100, citando sempre il vecchio indirizzo.

Fascicoli singoli arretrati — se disponibili — possono essere ordinati a lire 300 cadauno.
Non si spedisce contrassegno.

Distribuzione alle edicole di tutta Italia: Diffus. Milanese . Via Soperga, 57 - Milano.

Direttore responsabile: Giulio Borgogno.
Autorizzaz. N. 5357 - Tribunale di Milano.
Stampa: Intergrafica S.r.l. - Cologno Monzese.

La Direzione non rivende materiale radio; essa può comunicare, se richiesta, indirizzi di Fabbricanti, Importatori, Grossisti ecc. in grado di fornire il necessario ed ai quali il lettore può rivolgersi direttamente.

Alla corrispondenza con richiesta di informazioni ecc. si prega allegare sempre il **francobollo per la risposta.**

Parte del testo e delle illustrazioni è dovuta alla collaborazione del Bureau of Naval Personnel, nonchè al Dept. of the Army and the Air Force - U.S.A.

A chi può essere utile questo Corso? Anzitutto — stante la sua impostazione — il Corso, basato sull'esposizione in forma a tutti accessibile, della radiotecnica, dai suoi elementi basilari alla evoluzione più recente, rappresenta la forma ideale per tutti coloro che intendono dedicarsi all'elettronica, sia come forma ricreativa sia — soprattutto — per l'acquisizione di una professione specializzata che possa procurare loro una posizione di privilegio in seno alla società odierna.

Anno per anno, la nostra civiltà si indirizza sempre più verso questa meravigliosa, si potrebbe dire fascinosa, elettronica, che nel modo più evidente consente sviluppi impensati, progressi grandiosi e una rapida evoluzione di tutti gli altri rami dello scibile che essa tocca e influenza.

L'industria, tutta l'industria, nel senso più ampio, da quella elettrotecnica a quella meccanica, alla metallurgica, alla chimica ecc., con i suoi laboratori di ricerca e le sue fabbriche richiede, e richiederà sempre più, con un ritmo rapidamente crescente, tecnici specializzati con conoscenza dell'elettronica, tecnici specificatamente elettronici e persino operai e impiegati di ogni ordine e categoria con cognizioni di elettronica.

Si può dire che anche le branche commerciali, quelle dei trasporti e persino quelle amministrative con le recenti introduzioni delle calcolatrici, abbisognano di personale che conosca i principi dell'elettronica, le macchine relative, il loro pieno sfruttamento, la eventuale riparazione ecc. e, quanto più in modo completo, quanto meglio.

Nasce, da una tale situazione, una logica conseguenza: per la scelta di una professione o di un mestiere, per un miglioramento della propria posizione sociale, per l'intrapresa di una libera attività o anche per la sola acquisizione di cognizioni che indubbiamente verranno oltremodo utili, è quanto mai opportuno riflettere se non sia conveniente dedicare un po' di tempo allo studio di questa scienza che ha tra l'altro il pregio di rendersi immediatamente attraente, concreta, accessibile e foriera di moltissime soddisfazioni.

A questo scopo appunto, e con questi intenti, è stato redatto questo Corso.

Non mancano invero altri corsi (specie per corrispondenza) o scuole di radiotecnica, nè mancano (sebbene siano in numero del tutto inadeguato) scuole statali o pareggiate ma la struttura e l'impostazione che caratterizzano queste 156 lezioni sono alquanto particolari, presentando non pochi vantaggi sulle diverse altre forme di cui si è detto.

Anzitutto vogliamo porre in evidenza **il fattore economico.**

Frequentare regolarmente, durante tutto l'anno, una scuola è certo il modo più logico — anche se non il più rapido — per apprendere ma, tralasciando il fatto che rarissimi sono gli Istituti di radiotecnica, è a tutti possibile dedicarsi esclusivamente, e per l'intero anno, allo studio? Noi riteniamo che chi può farlo costituisca oggi assai più l'eccezione che la regola. Ciò significa infatti poter disporre liberamente del proprio tempo senza avere la necessità di un contemporaneo guadagno: il nostro Corso permette a chiunque di studiare a casa propria, nelle ore libere dal lavoro, senza abbandonare o trascurare quest'ultimo. Ciò caratterizza invero anche altri corsi, ma il vantaggio economico diviene notevole ed evidentissimo se si considera che di fronte all'esborso, anche se rateale, di quasi 80.000 lire che i corsi per corrispondenza richiedono, seguendo il nostro Corso la spesa in un anno risulta di poco più di 7500 lire (150 lire alla settimana presso un'edicola) o di 6630 lire totali, con recapito postale, settimanale, delle lezioni a domicilio.

E' superfluo dire che la Modulazione di Frequenza, i transistori, i circuiti stampati, la trasmissione, il telecomando ecc. sono argomenti integrali del Corso e non costituiscono motivo di corsi speciali, aggiunti o particolari.

Le lezioni di questo Corso — a differenza di molte altre — non sono stampate con sistemi di dispensa, a ciclostile, o con sistemi più o meno analoghi, derivanti cioè da un originale battuto a macchina da scrivere; esse sono stampate in uno stabilimento grafico, con chiari caratteri tipografici da cui deriva una assai più agevole lettura e — fattore certamente di non secondaria importanza — un contenuto molto più ampio, corrispondendo una pagina a stampa a tre o quattro pagine di quelle citate. Il lettore avrà, alla fine del Corso, un volume di ben 1248 pagine di grande formato!

Chiunque, indipendentemente dall'età, dalla professione e dalle scuole compiute **può seguire il Corso.** Alle esposizioni teoriche si abbinano numerose, attraenti, istruttive ed utili descrizioni che consentono la realizzazione di ricevitori, amplificatori, strumenti vari e persino di trasmittenti su onde corte.

A questo proposito è sintomatico il fatto che la Direzione non vuole assolutamente assumere la fisionomia di un fornitore o commerciante di materiale radio, rivendendo agli allievi le parti necessarie. Il materiale occorrente l'interessato può acquistarlo dove e come meglio crede e, assai spesso anzi, già ne dispone. Viene così evitato l'acquisto forzoso, caratteristico più o meno di tutti gli altri corsi.

Anche chi è già radiotecnico, anche chi ha seguito o segue altri corsi troverà il massimo tornaconto in questo completo ed aggiornato lavoro. Molte nozioni, è logico, saranno note, altre un po' meno e sarà utile rinfrescarle, e il tutto infine costituirà un manuale di consultazione, prezioso tanto per la teoria esposta quanto per i numerosi schemi, per le tabelle, per i grafici, gli elenchi, i dati, il vocabolario dei termini ecc.

Concludendo, si può affermare che questo **Corso di Radiotecnica** oltre che come insegnamento graduale si presenta come **enciclopedia e rivista assieme** ciò che permette di formare — con modestissima spesa — **il più completo, ricco, utile e pratico volume di radiotecnica di cui sia dato oggigiorno disporre.**

ANTENNE

L'antenna costituisce quel particolare tipo di circuito elettronico, già da noi sommariamente esaminato, che ha lo scopo di irradiare nello spazio, o ricevere dallo spazio, energia elettromagnetica. Ovviamente, nel primo caso si tratta di *antenne trasmittenti*, che si collegano all'uscita dei trasmettitori per distribuire nell'etere il segnale a radiofrequenza generato; nel secondo caso si tratta di *antenne riceventi*, che captano le onde elettromagnetiche provenienti da un'antenna trasmittente più o meno lontana.

Il principio di funzionamento è il medesimo, sia per le antenne trasmittenti che per quelle riceventi. Perciò, in questa lezione, dedicata allo studio teorico delle antenne, allorchè ci riferiremo alle antenne trasmittenti, resta inteso che i concetti esposti si adattano perfettamente anche alle antenne riceventi. Non solo il principio di funzionamento è eguale per i due tipi di antenne, ma lo è anche l'effettiva struttura, nel senso che, se un'antenna è adatta a trasmettere nel miglior modo una certa frequenza, essa è adatta anche a riceverla.

E' questo il principio della reciprocità delle antenne. Nonostante ciò, in pratica, le antenne trasmittenti vengono realizzate con una certa differenza di struttura nei rispetti di quelle riceventi, e ciò in particolare per i seguenti motivi. Innanzitutto, le antenne trasmittenti devono essere costruite in modo da poter sopportare forti correnti e tensioni, dato che ad esse viene applicata l'intera potenza fornita dal trasmettitore: le antenne riceventi, per contro, sono percorse solo da segnali debolissimi, determinati dai campi elettromagnetici presenti nello spazio. In secondo luogo, i trasmettitori lavorano solitamente su di una sola frequenza ben determinata, e quindi le dimensioni delle antenne trasmittenti vengono calcolate appositamente in corrispondenza del massimo rendimento nei confronti della frequenza di trasmissione. I ricevitori, invece, devono poter ricevere trasmissioni entro una vasta gamma di frequenze, perciò le antenne di ricezione non sono studiate per una frequenza particolare, bensì in modo da fornire un buon rendimento su un'intera gamma.

GENERALITA'

Vediamo ora quali siano le principali prerogative che differenziano le antenne dagli altri circuiti elettrici. Quando un circuito è percorso da corrente a radiofrequenza, l'energia circolante viene in parte sfruttata ed in parte dissipata sotto forma di calore. Ciò avviene nei normali circuiti a noi noti, che si incontrano sia nei ricevitori che nei trasmettitori.

Quando le dimensioni fisiche del circuito sono apprezzabili (nei confronti della lunghezza d'onda) si ha un'ulteriore causa di dissipazione di energia, determinata dal fatto che parte di essa viene irradiata nello spazio, sotto forma di onde elettromagnetiche. I circuiti progettati e realizzati in modo che l'energia ad essi fornita sia completamente irradiata (o quasi) nello spazio, sono appunto le antenne trasmittenti.

L'intensità del campo elettromagnetico irradiato da un tratto di filo conduttore percorso da corrente a radiofrequenza, dipende dalla lunghezza del filo e dalla intensità della corrente. A parità di dimensioni della antenna, l'irradiazione è massima in corrispondenza della massima corrente: pertanto è auspicabile che, a parità di potenza fornita all'antenna, il valore della corrente sia il più alto possibile.

Sappiamo già che in un circuito presentante, rispetto ad un segnale a radiofrequenza, sia resistenza che reattanza, la massima corrente si ottiene quando il circuito è accordato sulla frequenza in questione, ossia — come si suol dire — quando è in risonanza. In tali circostanze, infatti, le reattanze capacitiva ed induttiva sono tali da annullarsi vicendevolmente, e la corrente è limitata dalla sola componente resistiva. Ciò vale nel caso dei circuiti a costanti concentrate, ossia nei comuni circuiti accordati, nei quali l'induttanza è concentrata in un unico componente (la bobina) e la capacità in un altro, distinto dal primo (il condensatore). L'antenna è invece un circuito a costanti distribuite; in altre parole, in essa la capacità e l'induttanza sono distribuite uniformemente lungo tutto il circuito. Non sembrerà quindi strano che, nel caso dell'antenna, le condizioni di risonanza su di una determinata frequenza si possano ottenere attraverso una regolazione della lunghezza, dato che a tale regolazione corrispondono mutamenti nell'induttanza e nella capacità.

La risonanza

Si è sperimentalmente trovato che le condizioni di massima irradiazione sussistono quando la lunghezza dell'antenna è pari alla metà della lunghezza d'onda del segnale, oppure ad un multiplo di tale valore. A questo risultato si può pervenire anche per via del tutto teorica, sebbene con calcoli piuttosto complessi.

Come vedremo, la massima irradiazione, corrispondente alle condizioni di risonanza, è accompagnata dal-

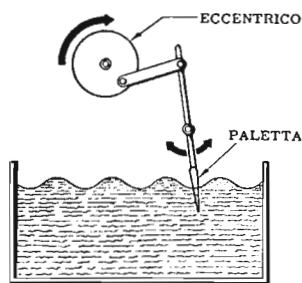



Fig. 1 - Formazione di onde stazionarie in una massa d'acqua contenuta in un recipiente, mediante un agitatore azionato da un eccentrico. Dando alla paletta agitatrice una velocità opportuna, le oscillazioni coincidono con le onde di ritorno: la superficie appare allora ferma, pur essendo ondulata.

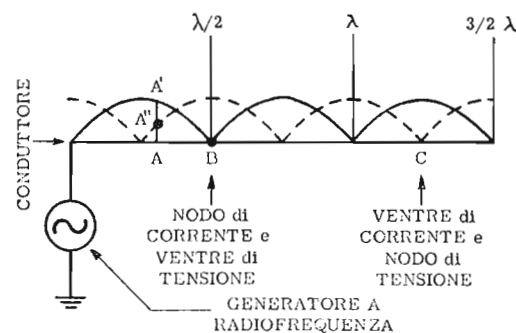



Fig. 2 - Distribuzione della tensione (tratteggiata), e della corrente (in tratto continuo), in un conduttore risonante avente un capo connesso al generatore e l'altro capo libero. La lunghezza è pari a 3 volte $\lambda/2$.

lo stabilirsi nel conduttore di **onde stazionarie,** sia di tensione che di corrente. Vediamo ora di illustrare, mediante una semplice analogia, il concetto di onda stazionaria. La **figura 1** rappresenta un recipiente contenente acqua, nel quale si muove, avanti ed indietro, una paletta agitatrice collegata ad un motore la cui velocità è regolabile con continuità. Il movimento della paletta determina delle increspature sulla superficie dell'acqua (onde), che si muovono verso i bordi del recipiente con una velocità ben definita. Le onde raggiungono i bordi, ed ivi, urtando contro la parete, ne risultano riflesse.

Per effetto della riflessione esse si riavvicinano al punto centrale e, se la paletta è ben centrata rispetto al recipiente, lo raggiungono al medesimo istante, ed in opposizione di fase tra loro, dato che in opposizione di fase erano state prodotte. In generale, il movimento della paletta non risulta in fase con quello delle onde che ritornano, ed in tal caso la superficie dell'acqua assume un andamento agitato, senza nessuna determinata caretteristica particolare. Scegliendo invece una adeguata velocità della paletta, si può fare in modo che il movimento delle onde generate coincida con quello delle onde di ritorno: si determinano allora delle « onde stazionarie » che — il nome lo dice — rimangono sempre nella medesima posizione. La superficie dell'acqua assume una configurazione ben determinata, immutabile nel tempo: si dice allora che il recipiente è in risonanza con la frequenza dell'agitatore.

Sperimentalmente si è trovato che **la più piccola dimensione che può avere il recipiente, perchè si determinino onde stazionarie, è pari alla metà della lunghezza delle onde stesse**: in questo caso la superficie dell'acqua assume, in ogni istante, un andamento simile a quello di una mezza onda, positiva o negativa. Analogamente, la più piccola lunghezza che può avere un conduttore, perchè possano in esso formarsi delle onde elettriche stazionarie — ossia perchè esso risulti in risonanza con la frequenza del segnale applicato — è pari alla metà della lunghezza d'onda del segnale stesso.

Distribuzione delle correnti e delle tensioni

Esaminiamo in qual modo le correnti e le tensioni si distribuiscono in un conduttore, ad un estremo del quale sia applicato un generatore di segnali sinusoi-dali a radiofrequenza; l'altro estremo del conduttore sia libero, ossia elettricamente isolato. Se il filo fosse infinitamente lungo, si propagherebbero lungo di esso — a partire dell'estremo collegato al generatore — delle onde sinusoidali di tensione e di corrente. La velocità di queste onde sarebbe elevatissima, quasi pari alla velocità della luce, e — date le inevitabili perdite — dopo un percorso più o meno lungo, le onde si attenuerebbero sempre più, fino ad annullarsi.

Se il conduttore ha invece una lunghezza limitata, le onde « urtano » ad un certo punto contro l'estremo libero, e vengono da questo riflesse, ritornando verso il generatore. Se il conduttore ha una lunghezza qualunque, arbitraria, non è facile calcolare ad ogni istante la distribuzione delle tensioni e delle correnti. Se invece la lunghezza è multipla di $\lambda/2$ (ossia della metà della lunghezza d'onda), si determinano delle onde stazionarie. Ciò perchè, quando l'onda riflessa raggiunge nuovamente il generatore essa si trova esattamente in fase con quella che il generatore sta in quell'istante fornendo. Si determina perciò una distribuzione regolare delle correnti e delle tensioni, del tipo di quella indicata alla **figura 2**. Con linea piena è ivi rappresentato l'andamento della corrente, e con linea tratteggiata quello della tensione.

Consideriamo il segmento A-A': esso rappresenta il valore efficace della corrente a radiofrequenza esistente nel punto A, scelto a caso lungo il conduttore. Analogamente il segmento A-A'' rappresenta il valore efficace della tensione a radiofrequenza ivi presente.

Esaminando la figura, si può notare che esistono certi punti in cui l'ampiezza delle oscillazioni si riduce a zero. Ciò significa che, in quei punti, non si verificano oscillazioni, e quindi la corrente, o la tensione, è sempre nulla. Tali punti vengono denominati **nodi**. Ad esempio, il punto B è un **nodo di corrente**, ed il punto C è un **nodo di tensione**. Analogamente, vi sono dei punti in cui l'ampiezza delle oscillazioni è massima, e tali punti vengono chiamati **ventri**.

E' importante notare che, nei punti corrispondenti ai ventri di corrente, si hanno anche i nodi di tensione e che, analogamente, in corrispondenza dei ventri di **tensione, si hanno i nodi di corrente**. Ad esempio, nel **punto B**, la tensione è massima e la corrente è nulla, **mentre nel punto C**, è massima la corrente e nulla la **tensione. Si può affermare** perciò che le onde stazio-

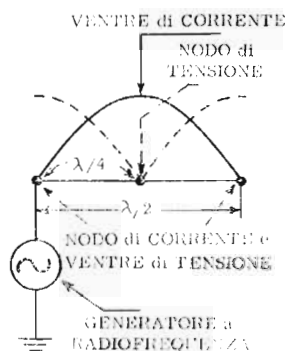



Fig. 3 - Caso analogo al precedente, con la differenza che la lunghezza del conduttore è pari a λ/2. Anche in questo caso sussistono le condizioni di risonanza sulla frequenza del segnale di eccitazione.

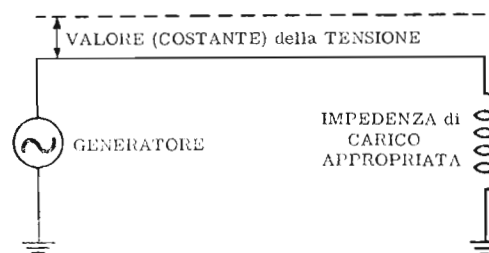



Fig. 4 - Chiudendo il circuito del terminale libero attraverso un'impedenza di carico di valore appropriato, non si ha più alcuna riflessione lungo il conduttore, in quanto detto carico dissipa tutta l'energia disponibile. La tensione è allora costante in ogni punto.

narie di tensione e di corrente sono sfasate tra di loro di 90°. Si badi bene che ciò non significa che anche le tensioni e le correnti siano sfasate tra loro di tale angolo. Infatti, in condizioni di perfetta risonanza la corrente e la tensione sono in fase, ed il circuito presenta pertanto una reattanza nulla.

Alla **figura 3** si nota il caso in cui la lunghezza del conduttore è eguale alla metà della lunghezza d'onda; si hanno due nodi di corrente e due ventri di tensione (nei punti estremi), ed un ventre di corrente e un nodo di tensione (nel punto centrale). Da questa figura si può inoltre notare che sia il nodo che i ventri, di corrente e di tensione, distano l'uno dall'altro di λ/2 (mezza lunghezza d'onda).

Per illustrare meglio il concetto di onda stazionaria, consideriamo una semplice misura che è possibile effettuare su di un conduttore, da un lato collegato ad un generatore di segnali a radiofrequenza, ed aperto all'altro estremo. Supponiamo di disporre di un voltmetro per segnali a radiofrequenza e di eseguire, in ogni punto del conduttore, una misura di tensione. Esaminando ancora il caso illustrato alla figura 2, ossia eseguendo le misure in condizioni di risonanza, si ottiene una lettura nulla in tutti i nodi di tensione, ossia in C, ed in tutti gli altri punti che distano da esso mezza lunghezza d'onda. La lettura massima si ottiene invece in *B* ed in tutti gli altri punti che corrispondono a ventri di tensione. Nei punti intermedi si hanno valori intermedi, proporzionali al segmento di verticale che unisce la linea orizzontale alla linea tratteggiata. Le letture eseguite, tuttavia, non corrispondono a valori continui, bensì a valori efficaci di tensioni alternate. In corrispondenza di ogni punto — ripetiamo — la tensione varia sinusoidalmente, alla frequenza del segnale emesso dal generatore; anche la corrente varia allo stesso modo, e tensione e corrente sono in fase tra loro. Si ha invece uno sfasamento di 90° nei punti in cui la tensione e la corrente raggiungono le ampiezze massime (o le ampiezze nulle).

Rapporto delle onde stazionarie (*R.O.S.*)

Nel caso precedente, il conduttore è stato supposto libero ad un estremo. Supponiamo ora che il conduttore sia infinito nella sua lunghezza, oppure che sia chiuso sulla sua impedenza caratteristica. In queste condizioni non si ha riflessione alcuna: nel caso del conduttore infinito, perchè le onde non trovano mai un'estremità libera che le rifletta, e diminuiscono progressivamente in ampiezza fino ad annullarsi; nel caso della chiusura del circuito sull' impedenza caratteristica — invece — perchè le onde vengono completamente utilizzate dal carico, sempre senza risultare riflesse. Mentre la prima circostanza ha un valore puramente teorico, dato che non si potrà mai avere un conduttore di lunghezza infinita, la seconda ha una certa importanza pratica, perchè l'ipotesi si verifica nella maggior parte dei circuiti elettronici dotati di carico. Quest'ultima circostanza è esemplificata alla **figura 4**.

Se ripetiamo l'esperimento del paragrafo precedente, e misuriamo la tensione alternata presente in ogni punto del conduttore, ci accorgiamo che tale tensione è costante. Ciò è comprensibile se si pensa che le onde, non essendo riflesse, scorrono liberamente nel conduttore e quindi — in ogni suo punto — la tensione letta col voltmetro per radiofrequenza corrisponde esattamente al valore efficace della tensione fornita dal generatore. Non si determinano pertanto onde stazionarie, *per il formarsi delle quali è indispensabile che si abbia un fenomeno di riflessione*.

Ricapitolando, in condizioni di riflessione totale, ossia con estremo del conduttore libero, il valore efficace della tensione alternata varia tra valori massimi e zero, secondo quanto illustrato alla figura 2; in condizioni di riflessione nulla, invece, il valore efficace della tensione alternata è sempre costante (caso della figura 4). Per di più, si può dimostrare che il valore massimo di tensione presente nei ventri, in condizioni di riflessione totale, è pari al doppio del valore della tensione che si ottiene nel caso della riflessione nulla.

Ci si domanda ora: cosa succede se le condizioni sono intermedie tra i due casi finora presi in considerazione, ossia se è presente una riflessione parziale?

La condizione di riflessione parziale si verifica, in pratica, allorchè il circuito è chiuso su di una impedenza inadeguata. In dipendenza della maggiore o minore diversità dell impedenza del carico rispetto a quella appropriata, si ottiene una maggiore o minore riflessione. Consideriamo le **figure 5-A** e **5-B**. In A si vede l'andamento della tensione alternata, lungo il conduttore. Questo andamento corrisponde ad una riflessione molto alta, ma non completa. Rispetto all'andamento della riflessione totale, si nota una minore

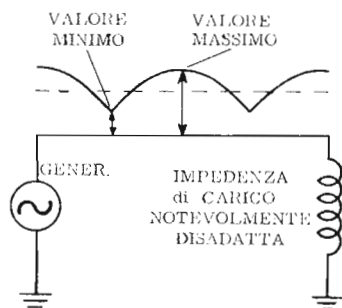



Fig. 5-A - Se l'impedenza di carico ha un valore inadatto, si ha una certa riflessione: tuttavia, i valori massimi e minimi della tensione sono diversi da quelli che sussistono senza alcun carico.

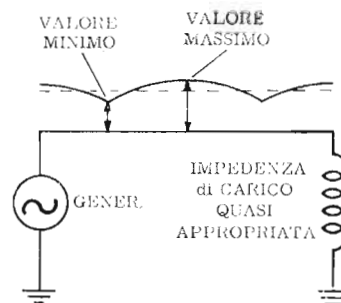



Fig. 5-B - Con un valore di impedenza prossimo a quello ideale si ha una riflessione ancora minore ed il valore efficace della tensione tende a diventare costante (l'R. [illegible] rossima a 1).

tensione massima ed una tensione minima diversa da zero. In B vediamo un altro caso analogo, corrispondente però ad una riflessione notevolmente inferiore. Ci si avvicina qui alle condizioni di riflessione nulla, dato che il valore efficace della tensione è pressochè costante. Tuttavia, si hanno egualmente dei massimi (di poco superiori rispetto al valore e_o della tensione del generatore), e dei minimi (di poco inferiori al valore stesso). Abbiamo rappresentato solo due casi intermedi — ma in realtà — il passaggio dalla condizione di riflessione totale a quello di riflessione nulla avviene gradualmente. Il **rapporto onde stazionarie**, detto anche R.O.S. oppure «S.W.R.» (dall'inglese «standing wave ratio») ci indica in quale misura un'onda che percorre un conduttore venga riflessa. Esso, precisamente, viene definito come rapporto tra il valore massimo ed il valore minimo che la tensione assume lungo il conduttore. Nel caso della *riflessione totale*, l'R.O.S. è *infinito*, dato che il valore minimo della tensione è zero; nel caso della *riflessione nulla*, l'R.O.S. è *eguale ad 1*, dato che non si hanno nè massimi nè minimi. In tutti gli altri casi si hanno dei valori intermedi, sempre corrispondenti a numeri maggiori di 1.

In base a quanto già noto, si può affermare che le condizioni di perfetta risonanza sono raggiunte quando l'R.O.S. è eguale ad infinito. Nel caso delle antenne, tale è quindi il valore auspicabile. Nei conduttori destinati semplicemente a trasferire energia elettromagnetica da un circuito all'altro, invece, è opportuno che — onde sfruttare tutta l'energia a disposizione — la riflessione sia minima (R.O.S. eguale ad uno).

Lunghezza di un'antenna

Quanto abbiamo detto in precedenza, circa la lunghezza che deve avere un conduttore per essere in risonanza con un segnale di una data frequenza, è valido solamente in prima approssimazione.

Mentre la frequenza di un segnale è costante, la sua lunghezza d'onda è una grandezza variabile dipendente dalla velocità di propagazione. Questa — a sua volta — dipende *dal mezzo* in cui le onde si propagano, e si può calcolare, nel caso di materiali non ferromagnetici, mediante la formula approssimata:

$$v = \frac{c}{\sqrt{k}}$$

ove c è la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nel vuoto (o, senza introdurre grave errore, nell'aria), e k è la costante dielettrica del mezzo. Dato che k è, in un mezzo materiale, sempre maggiore di uno, ne segue che **la velocità delle onde elettromagnetiche in esso è sempre minore che non nell'aria**. Ora, la lunghezza d'onda di un segnale alternato dipende dalla sua velocità di propagazione secondo l'espressione a noi ben nota:

$$\lambda = \frac{V}{F}$$

nella quale F è la frequenza del segnale. Si può pertanto dire che, in un conduttore, la velocità di propagazione è inferiore a quella che si verifica nell'aria e quindi anche la lunghezza d'onda ne risulta diminuita. In un dielettrico la velocità scende ancora di più, e con essa la lunghezza d'onda.

Dato che le lunghezze d'onda, di solito prese in considerazione, sono quelle relative al vuoto, ne risulta che un'antenna a mezza onda deve essere, in realtà, *un poco più corta del previsto*. Subentrano poi altri fenomeni, di natura complessa, che contribuiscono ad alterare la velocità delle onde, e quindi la lunghezza che deve avere un'antenna.

Occorre tenere conto principalmente del diametro del conduttore, come si vede alla **figura 6**. In corrispondenza di ogni rapporto tra la metà della lunghezza d'onda nel vuoto ed il diametro del conduttore che funge da antenna, si legge, sull'asse delle ordinate, il valore del coefficiente k. Per ottenere la lunghezza di un'antenna a mezza onda basta moltiplicare il valore della lunghezza che l'antenna dovrebbe avere, considerando la velocità dell'onda pari a quella nel vuoto, per il coefficiente k.

Come si può notare, il valore di k è sempre inferiore ad 1, e ciò corrisponde al fatto che la lunghezza deve essere sempre leggermente minore di quella calcolata nel caso del vuoto. Inoltre, k diminuisce col diminuire del rapporto tra mezza lunghezza d'onda ed il diametro del conduttore.

Ciò indica che più il diametro del conduttore costituente l'antenna è grande, minore deve essere la lunghezza del conduttore stesso per ottenere le condizioni di risonanza.

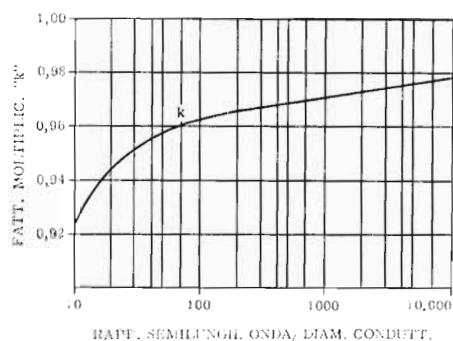



Fig. 6 - Calcolo della lunghezza in funzione del diametro del conduttore. Ad ogni rapporto tra $\lambda/2$ e diametro del conduttore, corrisponde un valore di « k », mediante il quale si calcola la lunghezza effettiva.

Fig. 7 - Principio del dipolo. Si tratta di un conduttore interrotto al centro: i due capi determinati dall'interruzione corrispondono ai terminali connessi all'uscita del generatore di segnali a radiofrequenza. La figura illustra anche la distribuzione della corrente (curva a tratto intero) e della tensione (curve tratteggiate).

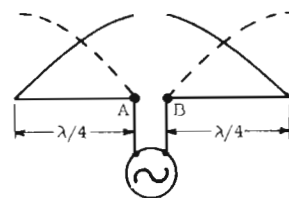
CARATTERISTICHE ELETTRICHE delle ANTENNE

Dato che l'antenna è un circuito elettrico, per conoscere e controllare il suo funzionamento è necessario tener conto, oltre che della lunghezza e del diametro del conduttore, anche di alcune grandezze elettriche, tra le quali figurano in primo luogo: l'impedenza, la reattanza, la resistenza di irradiazione, e la resistenza ohmica. Alcune di queste grandezze si definiscono, come vedremo, in modo perfettamente analogo al caso dei normali circuiti accordati a costanti concentrate, mentre altre richiedono particolari definizioni, caratteristiche esclusivamente delle antenne.

Impedenza — Prendiamo in considerazione una antenna del tipo rappresentato alla **figura 7**. Si tratta di un'antenna denominata **dipolo**, costituita da un conduttore interrotto nel suo punto centrale; ai due terminali centrali (che si ottengono interrompendo il conduttore) è connesso un generatore di segnali a radiofrequenza.

Tale generatore fornisce all'antenna una tensione alternata, e determina in essa un corrisponente flusso di corrente. Nei normali circuiti elettrici, il valore efficace della corrente è costante in ogni punto del conduttore; in un'antenna, invece — come abbiamo visto — si determinano, in condizioni di risonanza, delle onde stazionarie, ed anche al di fuori di tali condizioni la distribuzione delle correnti e delle tensioni non è costante lungo tutto il conduttore. Del resto, come vedremo, questa condizione di variabilità delle grandezze elettriche da un punto all'altro è essenziale perchè si effettui una buona irradiazione delle onde.

L'impedenza di un circuito percorso da corrente alternata (abbiamo visto a suo tempo) viene definita come il rapporto tra la tensione presente ai suoi terminali e la corrente che lo percorre. Nel caso delle antenne, evidentemente, questa definizione non è adeguata, dato che la corrente e la tensione non sono costanti in tutti i punti del circuito.

E' invece possibile definire correttamente l'impedenza, in ogni punto del conduttore che costituisce l'antenna, come rapporto tra la tensione e la corrente in quel punto. L'impedenza di un'antenna è quindi variabile da un punto all'altro e, in condizioni di perfetta risonanza, si annulla nei nodi di tensione, e diventa infinita nei nodi di corrente. Nei punti intermedi si hanno valori intermedi.

Quando un'antenna irradia onde elettromagnetiche, essa assorbe potenza, e ciò significa che la corrente non è in alcun punto completamente nulla; i nodi di corrente e di tensione non sono pertanto così accentuati da annullare completamente la grandezza relativa. L'impedenza varia perciò — in pratica — da un valore minimo (nei nodi di tensione) ad un valore massimo (nei nodi di corrente).

La definizione enunciata è l'unica veramente corretta per l'impedenza di un'antenna. Tuttavia, in pratica, molte volte si parla di « impedenza di un'antenna » con un significativo leggermente diverso, e precisamente riferendosi all'impedenza ottenuta come rapporto tra la tensione fornita dal generatore, o meglio la tensione presente ai suoi terminali (A e B in figura 7), e la corrente presente ai terminali stessi. Tale impedenza, più propriamente, dovrebbe essere denominata « impedenza di ingresso » dell'antenna, dato che viene misurata ai suoi terminali di ingresso. Essa è da tenersi in considerazione, come vedremo, per il calcolo delle linee di trasmissione (linee che collegano il trasmettitore, o il ricevitore, all'antenna).

Impedenza e risonanza — In condizioni di risonanza, le variazioni di tensione e di corrente lungo l'antenna sono massime, e sfasate tra loro di 90°. Pertanto l'impedenza, che è un loro rapporto, varia entro limiti più ampi. In condizioni di non risonanza, invece, le variazioni di tensione e di corrente, e quindi di impedenza, sono inferiori.

Quanto detto è essenziale per comprendere come, in condizioni di risonanza, l'irradiazione di onde elettromagnetiche da parte dell'antenna sia massima. Vediamo ora di analizzare il fenomeno.

In generale, quando una corrente alternata percorre un conduttore, determina nello spazio circostante un campo elettromagnetico alternativo. Questo campo non riesce tuttavia ad allontanarsi nello spazio, dato che l'energia ad esso relativa viene periodicamente irradiata da parte del conduttore, e successivamente da esso riassorbita. Questo, fino a che la frequenza del segnale non è molto elevata. Con l'aumentare della frequenza, la parte di energia che viene riassorbita dal conduttore diminuisce, e si determinano allora delle onde elettromagnetiche che si allontanano nello spazio. Si può dimostrare che questo procedimento di ir-

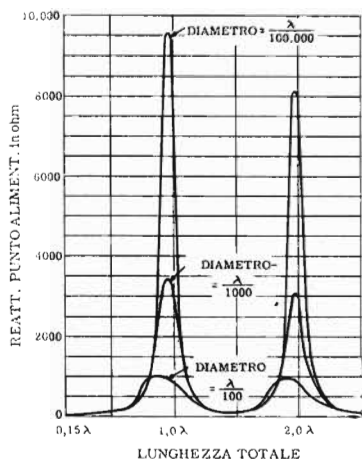



Fig. 8 - Resistenza di irradiazione di un'antenna in funzione della lunghezza totale del conduttore. I valori massimi della resistenza coincidono con lunghezze del conduttore pari a multipli di λ.

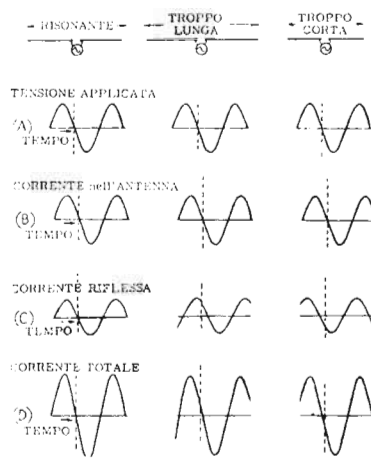



Fig. 9 - Andamento della tensione e della corrente (diretta e riflessa) in una antenna (dipolo) in condizioni di risonanza e di non risonanza. La tensione e la corrente diretta (A e B) sono in fase tra loro: la corrente riflessa (C) si combina con la corrente deretta, all'ingresso dell'antenna (D).

radiazione aumenta notevolmente quando le condizioni elettriche del circuito variano in modo brusco. Ora, in condizioni di risonanza, abbiamo visto che l'impedenza, la tensione, e la corrente, variano fortemente entro limiti molto ampi, mentre in condizioni di non risonanza tale condizione si verifica solo parzialmente: da ciò segue che nel primo caso si ha una maggiore irradiazione.

La preferenza che viene riservata, nella costruzione delle antenne, ai circuiti aperti, deriva da un motivo analogo. Infatti, ad un terminale libero si determina uno sbalzo molto brusco sia di tensione che di impedenza, e ciò favorisce l'aumento della quantità di energia irradiata.

Resistenza di irradiazione e resistenza ohmica — Riprendiamo in considerazione la figura 7, ed in particolare la tensione e la corrente nei punti A e B. Il prodotto tra tali valori fornisce, evidentemente, la potenza che il generatore invia all'antenna, e che viene da questa dissipata. Tale potenza si può anche esprimere, come nel caso dei normali circuiti, mediante il prodotto tra l'impedenza (in questo caso l'impedenza d'ingresso) ed il quadrato della corrente, ossia:

$$P = E \times I = Z \times I^2$$

ove E è la tensione presente tra i terminali A e B, I è la corrente in A od in B, Z è l'impedenza di ingresso.

La potenza fornita all'antenna viene emessa sotto forma di onde elettromagnetiche solo in parte: la rimanente viene dissipata sotto forma di calore, o viene dispersa in seguito a cattivo isolamento, scariche, ed altre cause del genere. Supponendo di trascurare queste ultime cause, che presentano carattere di irregolarità, la parte di potenza trasformata in calore è facilmente individuabile in base al valore della **resistenza ohmica** del conduttore. Più tale resistenza è alta, più alta è la potenza dispersa sotto questa forma.

Analogamente, si può introdurre il concetto di **resistenza di irradiazione**. La resistenza di irradiazione viene definita come quella resistenza che, disposta in serie ad un punto dell'antenna in cui è presente un ventre di corrente (corrente massima) determina una dissipazione di potenza pari alla potenza irradiata. Pertanto, la resistenza di irradiazione non ha alcun significato fisico reale, e viene introdotta esclusivamente allo scopo di dare una indicazione circa la quantità di energia effettivamente irradiata, rispetto a quella dissipata in altre forme.

Se chiamiamo r la resistenza ohmica ed R la resistenza di irradiazione, la potenza dissipata sotto forma di calore è proporzionale ad r, mentre quella irradiata nello spazio è proporzionale ad R. In un dipolo del tipo rappresentato alla figura 7, posto che la lunghezza complessiva del conduttore sia pari a mezza lunghezza d'onda, ossia che l'antenna lavori in condizioni di risonanza, il valore della resistenza di irradiazione è di circa 73 ohm. Ciò nel caso in cui non si verifichi alcuna perdita, e con un conduttore infinitamente sottile.

Consideriamo il grafico della **figura 8**. E', in esso, rappresentata la resistenza di irradiazione di un'antenna, in funzione della sua lunghezza. I picchi di massima resistenza di irradiazione si ottengono in corrispondenza dei multipli interi della lunghezza d'onda o, più precisamente, di valori leggermente inferiori (ciò per la stessa ragione illustrata a proposito della risonanza). Si potrebbe pensare che le migliori condizioni si ottengano, pertanto, con antenne corrispondenti ad una lunghezza d'onda, o a suoi multipli; infatti, il rendimento di un'antenna aumenta con l'aumentare della resistenza di irradiazione rispetto alla resistenza ohmica. In pratica, invece, si ottengono condizioni anche migliori con antenne a mezza onda.

La ragione di ciò risiede nei seguenti motivi:

1) La potenza irradiata non è proporzionale, in senso assoluto, alla resistenza R. Si definisce infatti **rendimento di un'antenna** il rapporto:

$$\alpha = \frac{R}{R + r_p}$$

ove R è la resistenza di irradiazione, ed r_p è la resistenza di perdita (somma della resistenza ohmica r con le altre resistenze, equivalenti alle perdite di potenza negli isolatori, ed altre cause analoghe). Ora, dato che r_p è, in ogni caso, piuttosto bassa — ossia dell'ordine di qualche ohm — anche se R scende a circa 70 ohm, come nel caso delle antenne a mezza onda, il rendimento rimane sempre buono.

2) L'irradiazione è migliore, a parità di potenza, quando la corrente è molto alta, e quindi la tensione poco elevata. In queste circostanze, la resistenza di irradia-

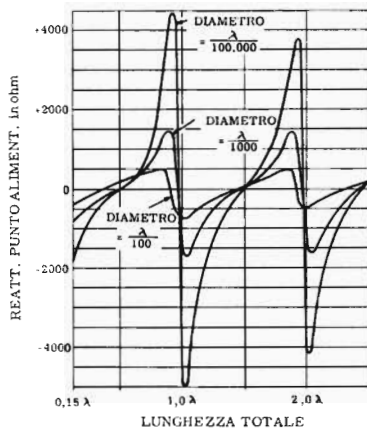



Fig. 10 - Variazione della reattanza in funzione della lunghezza dell'antenna. In condizioni di risonanza, la reattanza è nulla. Sono rappresentate tre curve relative a 3 diversi diametri del conduttore.

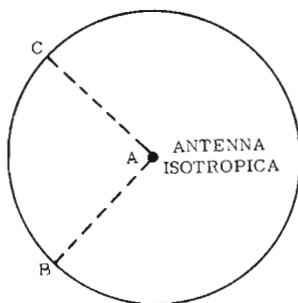
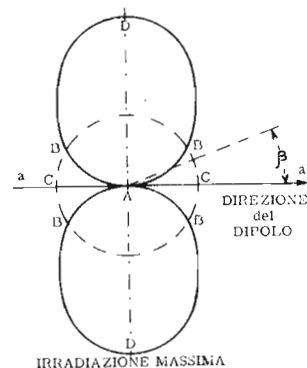



Fig. 11 - Il diagramma di irradiazione di un'antenna isotropica è una sfera, qui rappresentata in sezione, su un piano passante per il centro.

Fig. 12 - Diagramma di irradiazione di un dipolo a mezza onda (λ : 2).

zione R risulta alquanto bassa.

3) Occorre tener conto, oltrechè di R, anche della reattanza dell'antenna, secondo quanto vedremo al paragrafo successivo. La potenza effettivamente irradiata risulta infatti maggiore, a parità degli altri elementi, in condizioni di reattanza nulla.

Reattanza — Consideriamo la **figura 9**. In essa è rappresentato il valore — in un dato istante — della tensione e della corrente, di andata e di ritorno, in un dipolo, unitamente alla corrente complessiva risultante. Ciò, in tre casi, e precisamente in condizioni di perfetta risonanza, con antenna troppo lunga e con antenna troppo corta. Come si può notare, la corrente complessiva è — nel caso della risonanza — in fase con la tensione. Se l'antenna è troppo lunga, invece, la corrente segue la tensione di un certo angolo di sfasamento; si ha quindi la presenza di una reattanza induttiva nel circuito. Ricordiamo infatti che, nelle induttanze, la tensione precede la corrente di 90°. Nel caso dell'antenna troppo corta, viceversa, è la corrente che precede la tensione, proprio come avviene nei condensatori; si determina pertanto una certa reattanza capacitiva.

Più alta è la reattanza, induttiva o capacitiva, rispetto alla resistenza di irradiazione, più alta è la quantità di energia che, invece di venire emessa nello spazio, risulta riflessa verso il generatore. La potenza corrispondente a quest'ultima energia viene quindi dissipata all'interno del generatore; spesso si determinano serii guasti negli stadi finali dei trasmettitori, proprio perchè l'antenna non si trova in condizioni di risonanza, vale a dire di assorbimento.

Il fatto che, in presenza di componenti reattive, parte della potenza non venga irradiata e torni verso il generatore, è da collegarsi a quanto detto a proposito delle condizioni di risonanza. Infatti, la massima irradiazione corrisponde alle condizioni in cui le grandezze elettriche del circuito subiscono gli sbalzi più bruschi, ossia alla risonanza. Fuori risonanza, l'irradiazione diminuisce, e corrispondentemente aumenta la reattanza, che provvede a retrocedere la potenza non irradiata.

Anche il rapporto tra la reattanza e la resistenza R di irradiazione è quindi molto importante, ai fini della potenza effettivamente trasformata in onde elettromagnetiche. Consideriamo la **figura 10**, nella quale è riportato l'andamento della reattanza, in funzione della lunghezza dell'antenna. Come si vede, la reattanza si annulla in corrispondenza delle condizioni di risonanza, ossia poco prima di ogni multiplo di mezza lunghezza d'onda. La reattanza viene indicata positivamente o negativamente, secondo che si tratti di reattanza induttiva o reattanza capacitiva. Se confrontiamo la figura 10 con la figura 8, vediamo che R è molto elevata in corrispondenza di una lunghezza d'onda; allo stesso valore, tuttavia, anche la reattanza è notevole. Nel caso di mezza lunghezza d'onda, R è molto più bassa, ma la reattanza scende pressochè a zero, e quindi si raggiungono condizioni spesso migliori. Le due figure ora citate indicano tre tipi di curva, corrispondenti a diversi diametri dei conduttori, rapportati alla lunghezza d'onda. Come si vede, le variazioni di resistenza e di reattanza, al variare della lunghezza dell'antenna, risultano meno sensibili nella risonanza a mezza onda che non nella risonanza ad onda intera, e con conduttori di grosso diametro, piuttosto che con conduttori sottili.

DIRETTIVITA' delle ANTENNE

Ci siamo finora occupati delle condizioni necessarie affinchè un'antenna irradii la massima potenza, indipendentemente dalle direzioni in cui tale potenza viene irradiata. In realtà, le onde elettromagnetiche vengono emesse da un'antenna con intensità diversa nelle diverse direzioni. In certe direzioni l'irradiazione può scendere a zero, per salire in altre, a forti intensità. Ogni antenna ha, a questo proposito, sue caratteristiche particolari denominate **proprietà direttive**.

Per stabilire le proprietà direttive di ogni antenna, si ricorre al confronto con l'intensità di irradiazione della cosiddetta *antenna isotropica*. Questa antenna, che in realtà non può esistere, viene introdotta per comodità di discussione: essa è tale da assicurare — in teoria — una eguale irradiazione in tutte le direzioni.

Introduciamo ora il concetto di **diagramma di irradiazione**, caratteristico di ogni antenna: tale diagramma è atto a stabilirne in modo adeguato le proprietà direttive. Esso è una figura *tridimensionale*, immaginaria, che circonda l'antenna. Si tratta di una figura costruita in modo tale che, presa in considerazione una qualunque direzione di irradiazione, la lunghezza del segmento che unisce, in questa direzione, l'antenna alla superficie esterna della figura, è proporzionale all'intensità del campo che la

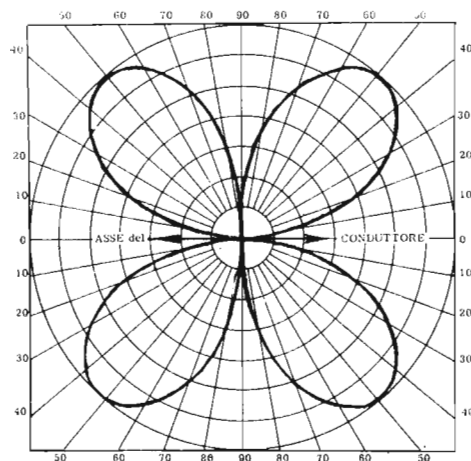



Fig. 13 - Diagramma di irradiazione di una antenna di lunghezza pari a λ, ossia a onda intera. Si noti la variazione delle proprietà direttive, rispetto all'antenna a mezza onda di figura 12.

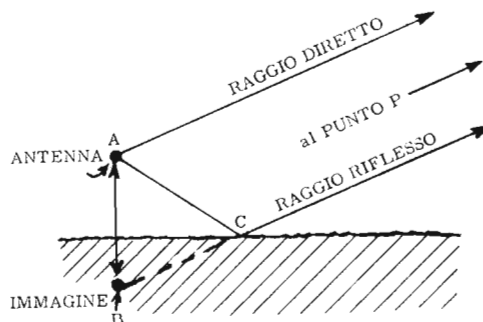



Fig. 14 - Riflessione delle onde elettromagnetiche da parte della superficie terrestre. I due raggi risultano tra di loro sfasati in alcuni punti, ed in fase in altri. Si hanno perciò, verso il punto P, zone in cui la ricezione è massima, ed altre in cui è, invece, minima.

antenna irradia in quella direzione.

Nel caso dell'antenna isotropica, il diagramma di irradiazione è, evidentemente, una sfera, avente il proprio centro in corrispondenza dell'antenna. Consideriamo una qualunque direzione di irradiazione; per ottenere l'intensità corrispondente a tale direzione, tracciamo una retta, uscente dall'antenna, ossia dal centro della sfera, ed avente la direzione scelta. L'intensità è, come abbiamo detto, proporzionale alla lunghezza del segmento compreso tra l'antenna e la superficie del diagramma di irradiazione. In questo caso, pertanto essa è proporzionale al raggio della sfera.

Se consideriamo un'altra qualsiasi direzione, l'intensità relativa è ancora proporzionale al corrispondente raggio della sfera. I raggi di una sfera sono tutti eguali tra di loro, e quindi l'intensità è costante in tutte le direzioni. Ciò corrisponde al fatto che si era presa in considerazione un'antenna isotropica.

Dal momento che i diagramma di irradiazione sono tridimensionali non è possibile rappresentarli adeguatamente mediante una illustrazione a due dimensioni. Tuttavia, per comodità, si rappresentano le loro intersezioni con dei piani opportunamente scelti, passanti per l'antenna. Ad esempio, il diagramma di irradiazione dell'antenna isotropica si può intersecare con un qualunque piano passante per il suo centro; si ottiene, in ogni caso, una circonferenza, come in **figura 11**.

Vediamo ora come si possono stabilire i diagrammi di irradiazione di antenne reali. Essi si tracciano in base al confronto con un'antenna isotropica che irradii, complessivamente, la medesima potenza. Il diagramma sarà ancora una figura solida, ma non più, in generale, una sfera. In quelle direzioni corrispondenti ad irradiazione eguale a quella dell'antenna isotropica equivalente, i punti del diagramma coincidono effettivamente con quelli della sfera, mentre nelle direzioni in cui l'intensità è *maggiore* i punti si trovano all'*esterno*. Nelle direzioni in cui l'intensità è *minore*, al contrario, i punti sono più *interni*. Consideriamo, ad esempio, un dipolo a mezza onda. L'intersezione del suo diagramma di irradiazione con un piano qualunque contenente il dipolo è rappresentato alla **figura 12**. In linea tratteggiata è indicato il diagramma dell'antenna isotropica corrispondente. Nelle direzioni AB, l'intensità di irradiazione è eguale a quella dell'antenna isotropica, nelle direzioni AC (angolo di irradiazione di 0°) l'intensità è zero. Nelle direzioni AD l'intensità è massima. In sostanza, per angoli di irradiazione inferiori a β, l'intensità è minore di quella dell'antenna isotropica di pari potenza, mentre per gli angoli maggiori, è maggiore.

Come si è detto, la figura non rappresenta il diagramma, bensì la sua intersezione con un piano. Tuttavia la rappresentazione è sufficiente a caratterizzare completamente le proprietà direttive del dipolo, dato che queste sono simmetriche. Infatti, il diagramma vero e proprio (figura tridimensionale) si ottiene semplicemente ruotando la figura a due dimensioni attorno alla retta *a-a'*, indicante la direzione del conduttore che funge da antenna.

La figura 12 è valida nel caso di un dipolo in condizioni di risonanza, e più precisamente del tipo a mezza onda. In condizioni di risonanza ad onda intera, invece, si è ottenuto il diagramma di irradiazione di cui alla **figura 13**. Le proprietà direttive, pertanto, variano notevolmente al variare della lunghezza dell'antenna; nella lezione 123[a], presenteremo una serie di diagrammi di irradiazione, corrispondenti a vari tipi di risonanze.

I diagrammi delle figure 12 e 13 sono validi nel caso in cui un dipolo sia molto lontano da qualunque corpo solido, ossia immerso nello spazio vuoto. Ogni superficie solida nelle vicinanze modifica le proprietà direttive, alterando i diagrammi di irradiazione. In particolare, la superficie terrestre, che si trova sempre nelle vicinanze di ogni antenna, modifica i diagrammi in modo essenziale. Essa, infatti, determina la riflessione delle onde irradiate verso il basso (con angoli di irradiazione negativi). Le onde riflesse si dirigono successivamente verso lo spazio, come si vede alla **figura 14**, ed interagiscono con quelle inviate direttamente dalla antenna nella stessa direzioni. In certi punti le onde risultano in fase, sommandosi, mentre in altri sono più o meno sfasate. Dove si determina opposizione, le onde si annullano parzialmente a vicenda.

Alla figura 14 vediamo due raggi che percorrono la medesima direzione, diretti verso lo stesso punto *P*. Il raggio riflesso, proveniente da *A* e riflesso in *C*, è come se provenisse dal punto *B*, al di sotto della superficie terrestre. Tale punto *B* è perfettamente simmetrico del punto *A*, e prende il nome di « antenna immagine ». Nel calcolo teorico dei diagrammi di irradiazione, si tiene conto appunto dell'antenna immagine, e si sommano i suoi effetti a quelli dell'antenna reale.

LINEE di TRASMISSIONE

Nel corso della lezione precedente abbiamo studiato il comportamento delle antenne trasmittenti. In considerazione degli effetti determinati dalla vicinanza della superficie terrestre, ai quali abbiamo fatto cenno, ed anche per ragioni inerenti la particolare caratteristica di propagazione delle radioonde — che studieremo in una lezione successiva — è necessario che le antenne siano disposte con orientamenti particolari, e spesso, installate a notevole altezza rispetto al suolo. Per questi motivi non è sempre possibile collocare il trasmettitore nelle immediate vicinanze dell'antenna; si rende allora necessaria la presenza di particolari circuiti, atti a trasferire all'antenna l'energia presente all'uscita del trasmettitore.

I circuiti di cui sopra sono denominati **linee di trasmissione**, appunto perchè hanno la funzione di trasferire l'energia da un circuito ad un altro. Le linee di trasmissione sono usate non solo per trasferire all'antenna la potenza del trasmettitore, ma anche per il collegamento delle antenne riceventi ai ricevitori relativi. Certe volte, specialmente nel campo della telefonia e delle telecomunicazioni, vengono effettuate vere e proprie trasmissioni da una località ad un'altra mediante segnali a radiofrequenza modulati, trasferiti su un cavo coassiale. I cavi coassiali rappresentano anche essi, in questo caso, delle linee di trasmissione.

In questa lezione ci occuperemo, tra i vari tipi di linee di trasmissione, di quelli che riguardano più direttamente la radiotecnica, ossia collegamenti tra trasmettitori ed antenna e tra ricevitori ed antenna. Così come si è osservato per le antenne, quanto viene detto a proposito della trasmissione si intende valido egualmente nei riferimenti della ricezione.

REQUISITI GENERALI

Come sappiamo, ogni conduttore che presenta una lunghezza apprezzabile rispetto alla lunghezza d'onda del segnale che lo percorre, emette delle onde elettromagnetiche. Esso diviene quindi, da questo punto di vista, un'antenna trasmittente. E' chiaro che una buona linea di trasmissione non deve assolutamente presentare tale genere di dispersione, dato che la sua funzione è quella di **trasferire** il segnale, e non di irradiarlo nello spazio. Ciò, sia nel caso dei trasmettitori che nel caso dei ricevitori. Dato che le linee sono spesso notevolmente lunghe, è facile però che, se non si prendono particolari precauzioni, sussista una irradiazione, a volte anche rilevante.

Oltre all'energia dispersa sotto forma di irradiazione, occorre considerare, tra le perdite che si possono verificare nelle linee di trasmissione, quella dovuta alla resistenza ohmica del conduttore, che trasforma in calore parte dell'energia.

Come evitare l'irradiazione — L'irradiazione di onde elettromagnetiche da parte delle linee di trasmissione, può essere evitata facendo in modo che il circuito sia costituito da **due** conduttori, i cui campi elettromagnetici si annullino a vicenda. In tali circostanze, il campo determinato da uno dei conduttori è eguale ma di segno opposto, a quello determinato dall'altro, ossia, complessivamente, non si ha irradiazione alcuna.

Una possibile disposizione è indicata alla **figura 1**. Sono ivi rappresentati due conduttori paralleli, percorsi dalle correnti $I1$ ed $I2$, che fluiscono in direzioni opposte. Se la corrente $I1$, che fluisce dal punto A, ha lo stesso valore della corrente $I2$, che fluisce dal punto B, i campi stabiliti da queste due correnti sono eguali in intensità, ma poichè le due correnti fluiscono in direzioni opposte, il campo creato da $I1$ si trova in opposizione di fase rispetto a quello determinato da $I2$.

Poichè tra i due conduttori esiste una certa distanza, d, e i campi eletromagnetici non si propagano istantaneamente, bensì con una certa velocità, c, che, nell'aria, corrisponde alla velocità della luce, il campo presente ad un certo istante in un dato punto dello spazio dipende dai valori delle correnti in istanti precedenti. Ad esempio, nello stesso punto A, esso dipende per la corrente $I1$, dall'istante considerato, ma per la corrente $I2$ da un istante precedente, dato che il campo creato dalla corrente in B impiega un certo tempo a trasferirsi in A.

Supponiamo che le correnti $I1$ ed $I2$ siano alternate: è questo il caso che ci interessa maggiormente, dato che le linee di trasmissione vengono sempre percorse da segnali a radiofrequenza. Durante l'intervallo di tempo in cui un campo elettromagnetico generato in B dalla corrente $I2$ si trasferisce in A, la corrente $I1$ si è leggermente spostata di fase, e quindi il campo che essa genera non è del tutto eguale ed opposto all'altro. I due campi sarebbero in ogni punto esattamente in opposizione di fase solo nel caso in cui i due conduttori occupassero la medesima posizione, il che è impossibile, trattandosi di due conduttori separati.

Si ricorre pertanto ad un compromesso, facendo in modo che i due campi siano il più possibile vicini alle condizioni di opposizione di fase. Ciò si può ottenere riducendo la distanza d tra i conduttori al minimo va-

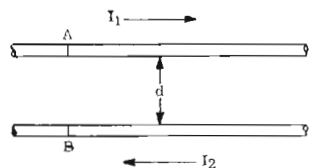



Fig. 1 - Esempio di linea bipolare per il collegamento di una antenna. I due flussi, eguali e contrari, si annullano a vicenda.

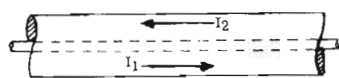



Fig. 2 - Aspetto di un cavo coassiale. La parte esterna è una calza metallica, che neutralizza il flusso del cavo interno

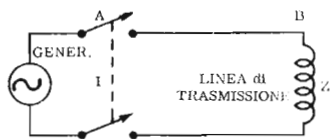



Fig. 3 - Linea per il collegamento dal generatore (A) al carico (B). Una volta chiuso l'interruttore (I), le onde raggiungono il carico.

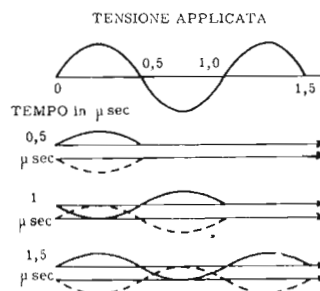



Fig. 4 - Con una frequenza di 1 MHz, la propagazione lungo la linea avviene in un determinato tempo, frazionabile come indicato, a seconda della fase. Se l'impedenza dissipa tutta l'energia fornita, la tensione lungo la linea è costante in tutti i punti.

lore compatibile con le altre esigenze meccaniche ed elettriche della linea. Benchè, al diminuire di *d*, ci si avvicini alle condizioni ideali, dato che lo sfasamento di cui si è parlato diminuisce, è tuttavia sempre presente una certa irradiazione, poichè i campi generati dalle due correnti non si annullano mai totalmente. Come vedremo dall'esempio che segue, l'irradiazione dipende dalla frequenza del segnale, oltre che dalla distanza *d*, e precisamente aumenta all'aumentare della frequenza come si osserverà negli esempi successivi.

Supponiamo che *d* sia eguale a 10 cm, e che la frequenza del segnale sia di 1 MHz, e calcoliamo lo sfasamento introdotto dalla distanza tra i due conduttori. Supponendo che questi siano immersi nell'aria, il campo magnetico generato in B da *I*2 impiegherà, per giungere in A, un tempo:

$$t = d : c$$

ove *c* è la velocità di propagazione delle onde elettromagnetiche nell'aria, (3×10^{10} cm/sec). Sostituendo, si ottiene:

$$t = \frac{10}{3 \times 10^{10}} = \frac{1}{3} \times 10^{-9} \text{ secondi,}$$

ossia 1/3.000 di microsecondo. Dato che il periodo corrispondente alla frequenza di 1 MHz è di 1 µsec, ne deriva che in 1/3.000 di µsec il segnale compie 1/3.000 di ciclo , corrispondente a circa 1/8 di grado di spostamento di fase. Si può pertanto affermare che, alla frequenza di 1 MHz, la distanza di 10 cm apporta uno sfasamento supplementare, aggiungentesi a quello di 180° dovuto alla opposizione nel flusso delle correnti, di circa 1/8 di grado; esso è del tutto trascurabile.

Rieseguendo il calcolo in riferimento alla frequenza di 60 MHz, si trova però che l'angolo di spostamento di fase è salito a 7° e 12', ossia è già di entità rilevante. A 200 MHz infine, l'angolo è di circa 25°, e quindi è tale da alterare completamente il rapporto tra i due campi, in modo che l'effetto di annullamento reciproco si verifichi solo in modo parziale.

Dagli esempi riportati, risulta che è della massima importanza il rapporto tra la distanza *d* e la lunghezza d'onda del segnale. Esso deve essere, perchè l'annullamento da considerarsi sia sufficiente, inferiore ad 1/100; ciò significa che *d* deve essere inferiore all'1% della lunghezza d'onda. Operando a 20 MHz, ossia ad una lunghezza d'onda di 15 m, la massima distanza tra i conduttori della linea di trasmissione deve essere 15 cm, corrispondenti ad un angolo di spostamento di fase di 3°36'.

Le linee di trasmissione del tipo di quelle illustrate alla figura 1, sono denominate **linee a conduttori paralleli,** e sono molto usate per accoppiamenti alle antenne. Per evitare l'inconveniente dell'irradiazione, è possibile utilizzare anche un altro tipo di linea: il cosiddetto **cavo coassiale.** In questo caso uno dei due conduttori è a forma cilindrica cava e racchiude, nel suo interno, il secondo conduttore come in **figura 2**.

La corrente che fluisce nel conduttore interno determina un campo elettromagnetico che viene bilanciato da quello generato dalla corrente che percorre il conduttore esterno, e ciò per il fatto che dette correnti hanno eguale intensità e direzione opposte. Inoltre, il conduttore esterno viene quasi sempre collegato a massa, in modo che le correnti a radiofrequenza lo percorrono esclusivamente lungo la superficie interna. La superficie esterna, a massa, funge da schermo, impedendo così l'irradiazione di eventuali campi elettromagnetici stabilitisi all'interno del cavo. In base a quanto detto, non è in questo caso essenziale, ai fini della diminuzione della irradiazione, la distanza tra il conduttore interno e quello esterno. Essa è, tuttavia, molto importante per altre ragioni, e principalmente per l'impedenza della linea. Di quest'ultimo argomento ci occuperemo più avanti.

Distribuzione delle correnti e delle tensioni — Già conosciamo la distribuzione che le correnti e le tensioni assumono nelle antenne. Ivi, in condizioni ideali — ossia di risonanza — si determinano delle onde stazionarie, dato che gli estremi liberi riflettono le onde, retrocedendole con la fase adatta. Nel caso delle linee di trasmissione, invece, le onde si propagano liberamente dall'entrata verso l'uscita, e vengono totalmente utilizzate dal carico, senza che si verifichi riflessione alcuna. Ciò, sempre nel caso delle condizioni ideali; in pratica, può capitare che anche nelle linee di trasmissione si verifichi, sia pure parzialmente, il fenomeno delle onde stazionarie, o per la presenza di un'antenna con impedenza di carico inadatta, o perchè l'impedenza stessa è in parte reattiva, e quindi rimanda indietro energia.

Supponiamo, comunque, che la linea lavori senza

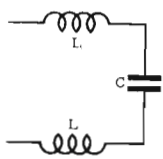



Fig. 5 - Suddividendo una linea in tanti piccoli segmenti, si hanno altrettanti circuiti LC. I valori L sono intrinsechi dei conduttori, e la capacità C sussiste tra i medesimi.

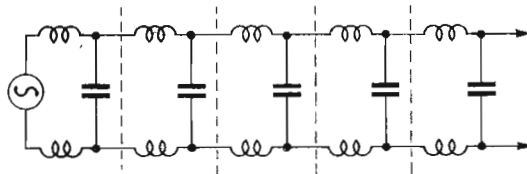



Fig. 6 - Rappresentazione teorica dei circuiti LC di figura 5, distribuiti lungo una linea di trasmissione, tutti in serie tra loro. Le reattanze in serie, unitamente alle capacità in parallelo, costituiscono una serie di piccoli circuiti accordati che limitano la corrente circolante. Tra ognuno di essi e quello successivo, sussiste però l'adattamento di impedenza, per cui l'energia passa senza attenuazione apprezzabile.

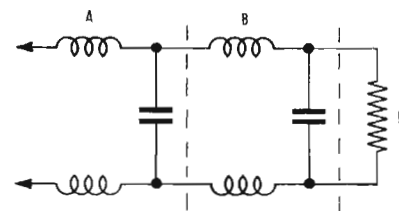



Fig. 7 - Se, al termine della linea, viene applicato un carico (R) pari all'impedenza caratteristica della linea, si ha il massimo trasferimento di energia, pari a quello che sussiste tra una sezione LC e quella successiva, come in figura 6.

alcuna riflessione, ossia trasferisca energia in un solo senso, da A verso B (**figura 3**). Se, ad un dato istante, chiudiamo l'interruttore *I*, che fornisce energia alla linea, lungo di essa cominciano a propagarsi onde di corrente e di tensione, come si vede, dopo diversi periodi di tempo dalla chiusura, nelle diverse sezioni della **figura 4**. Nell'esempio si è considerata una frequenza eguale ad 1 MHz. Giunte all'estremità della linea, le onde vengono completamente utilizzate dalla impedenza di carico Z (solitamente dall'antenna), senza essere retrocesse. Se si misura con un voltmetro per radiofrequenza la tensione lungo la linea, si trova che essa è costante in tutti i suoi punti, corrispondentemente al fatto che non si determinano onde stazionarie.

IMPEDENZA

Sia nel caso del cavo coassiale, sia nel caso dei conduttori rettilinei, paralleli, le linee di trasmissione presentano una capacità distribuita rilevante. Ciò è ovvio, dato che i due condensatori si trovano piuttosto vicini l'uno all'altro, e quindi presentano una certa capacità per unità di lunghezza, dipendente dalla loro distanza e dalla loro forma. Si determina perciò, specialmente in una linea di notevole lunghezza, una capacità complessiva di alto valore. Ci si domanda allora: come mai i segnali che si trasferiscono lungo la linea di trasmissione non risultano attenuati, o annullati, a causa della forte capacità in parallelo?

Come già detto, una perfetta linea di trasmissione deve presentare la minima resistenza ohmica e la minima reattanza, onde non si verifichino, in essa, nè perdite nè riflessioni. Sorge allora spontaneo un altro interrogativo. Dato che la resistenza è molto bassa, anzi, in condizioni ideali, nulla, si ottiene una corrente infinitamente alta, secondo la legge di Ohm, oppure una corrente proporzionale alla tensione applicata?

Circuito equivalente — La risposta ad entrambi gli interrogativi precedenti si ottiene considerando il circuito elettrico equivalente alla linea di trasmissione. Vediamo di risolvere, dapprima, il secondo problema, ossia quello dell'entità della corrente che circola in una linea di trasmissione. In effetti, se si misura la corrente, si trova che essa non solo ha un valore finito, ma risulta proporzionale alla tensione applicata. Perchè la legge di Ohm continui ad essere valida, occorre allora ammettere che le linee di trasmissione abbiano una certa impedenza, diversa da zero. Ciò si può giustificare col ragionamento che segue.

Occorre innanzitutto considerare che una linea di trasmissione è un circuito elettrico a costanti distribuite. Essa presenta quindi, oltre ad una capacità distribuita, una certa induttanza per unità di lunghezza.

Immaginiamo di suddividere una linea in tanti trattini, di lunghezza estremamente breve. Ogni trattino può essere rappresentato da un circuito elementare del tipo di **figura 5**. Effettivamente, tale rappresentazione non è rigorosamente esatta, specialmente per quanto riguarda la presenza della capacità. In pratica, la figura 5 dà chiaramente l'idea di una induttanza distribuita, mentre non esprime altrettanto nettamente il fatto che anche la capacità sia distribuita. Quest'ultima viene, infatti, concentrata nel condensatore C; tuttavia, se i trattini in cui la linea viene suddivisa sono molto brevi, non si commette un grave errore considerando la capacità di ogni tratto concentrata in un unico condensatore.

Complessivamente, una linea di trasmissione si può considerare come costituita da un insieme di moltissimi circuiti LC elementari del tipo di figura 5. Si ottiene, pertanto, la rappresentazione di **figura 6**.

La presenza, oltre che delle capacità *C* in parallelo, anche di tante piccole induttanze *L* in serie, fa sì che la carica dei condensatori *C* risulti rallentata; ogni circuito elementare si comporta analogamente ad un piccolo circuito accordato, e presenta una certa resistenza dinamica. Tale resistenza limita il flusso di corrente, e lo rende proporzionale alla tensione applicata.

Possiamo ora rispondere anche alla prima domanda che ci eravamo posti, ossia alla ragione per la quale il segnale, nonostante la forte capacità in parallelo, non subisce attenuazioni rilevanti. La presenza dell'induttanza distribuita fa sì che il segnale si trasferisca da un circuito elementare al successivo lungo tutta la linea senza subire attenuazione, posto che l'induttanza e la capacità siano distribuite uniformemente lungo tutta la linea. In tali circostanze, infatti, ogni singolo circuito elementare *LC* si adatta, perfettamente, al precedente ed al successivo.

Vediamo di illustrare in qual modo l'energia si propaghi lungo una linea di trasmissione. Ogni induttanza oppone al passaggio del segnale una certa reat-

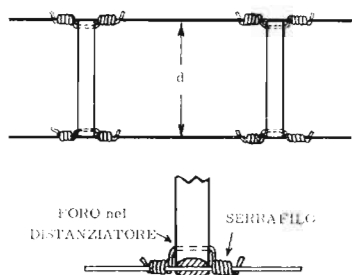



Fig. 8 - Linea a conduttori paralleli con isolamento ad aria. La distanza tra i due conduttori è mantenuta costante da distanziatori tutti eguali, ad intervalli regolari.

Fig. 9 - Grafico per il calcolo dell'impedenza caratteristica di una linea a conduttori paralleli, in funzione della distanza e della loro sezione. Il valore di Z viene letto direttamente sull'asse verticale.

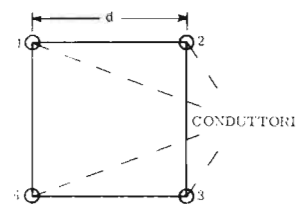
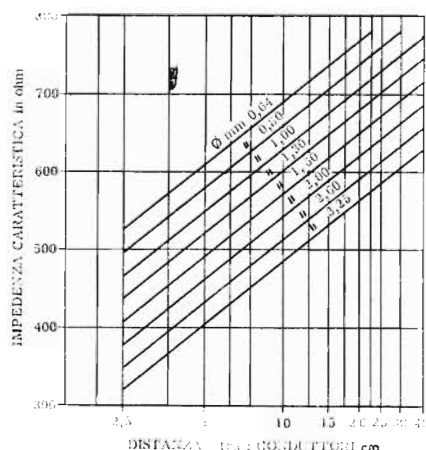



Fig. 10 - Esempio schematico di linea a quattro conduttori, disposti ai quattro angoli di un quadrato. I conduttori corrispondenti a due vertici opposti vengono uniti tra loro al termine della linea, che resta bipolare.

tanza, che limita la velocità di carica del condensatore immediatamente successivo. Come conseguenza, si ottiene un rapporto ben definito tra la tensione e la corrente in ogni punto della linea. Se le caratteristiche costruttive — e quindi il rapporto tra l'induttanza e la capacità — sono costanti lungo tutta la linea, anche il rapporto tra tensione e corrente risulta costante. Questa condizione è essenziale, se si vuole che il segnale venga trasferito senza attenuazione.

Impedenza caratteristica — La presenza di un rapporto ben definito tra tensione e corrente, fa sì che esista una resistenza apparente, chiamata **impedenza caratteristica** della linea di trasmissione, pari a tale rapporto. Non si tratta di una vera e propria impedenza, tuttavia, la definizione è giustificata dal fatto che, anche in tutti i circuiti di tipo normale, l'impedenza è sempre data da un rapporto tra tensione e corrente. Inoltre, una definizione simile era stata considerata anche nel caso delle antenne, con unica differenza che, allora, l'impedenza risultava diversa da punto a punto, mentre nel caso della linea di trasmissione essa è costante in tutti i punti (e per questo viene denominata impedenza caratteristica).

Attraverso semplici calcoli, si perviene al valore dell'impedenza caratteristica di una linea di trasmissione, che è data dalla formula:

$$Z = \sqrt{L : C}$$

nella quale Z è l'impedenza, L è l'induttanza e C è la capacità per unità di lunghezza. Questa formula è valida — si intende — per linee ideali, ossia prive di resistenza ohmica e di perdite tra i conduttori.

Si possono costruire linee di trasmissione di impedenza qualunque tenendo presente che la *capacità* per unità di lunghezza aumenta al diminuire della distanza tra i due conduttori, mentre *l'induttanza* per unità di lunghezza aumenta col diminuire del loro diametro. Ne consegue che una linea costituita da due conduttori paralleli di grosso diametro, notevolmente vicini l'uno all'altro, presenta un'impedenza caratteristica piuttosto bassa. Viceversa, una linea costituita da conduttori sottili e distanti ha un'impedenza molto alta, dato che presenta una forte induttanza ed una bassa capacità.

Adattamento delle linee al carico — Fi ora abbiamo trattato delle linee di trasmissione indipendentemente dal carico presente ai terminali di uscita, ossia come se fossero di lunghezza indefinita. In pratica, la lunghezza delle linee è finita, ed ai terminali di uscita è connesso un carico di impedenza appropriata che assorbe l'energia da essa trasferita. Il carico può essere di due tipi, secondo il valore della sua impedenza: se quest'ultima è pari a quella della linea, si parla di « linea adattata », mentre se essa è diversa si ha una « linea disadattata ».

Prendiamo in considerazione la **figura 7**. In essa sono rappresentati gli ultimi due tratti in cui si immagina suddivisa una linea di trasmissione, e la resistenza *R*, che costituisce il carico. In una linea di lunghezza infinita, il segnale si propaga in una sola direzione, a partire dal generatore. Ogni circuito elementare *LC* provvede a trasferire l'energia sul circuito successivo. Se pertanto, ad un certo punto, si sostituisce il circuito *LC* ivi presente con un terminale resistivo che offra le medesime caratteristiche di impedenza, i tratti precedenti della linea non subiscono alcuna modifica nelle loro condizioni di lavoro, e continuano a svolgere regolarmente le loro funzioni di elementi di trasferimento dell'energia. Nella figura si nota che all'uscita del circuito B della linea è applicata una resistenza pura *R*.

Il valore di *R* è pari all'impedenza caratteristica della linea, e pertanto, il circuito B non ne risente influenza alcuna, e si comporta come se dopo di esso la linea continuasse infinitamente. Questo esempio è riferito al caso di una « linea adattata », appunto perchè è stato eseguito il necessario adattamento di impedenza.

In una linea di trasmissione adattata, l'energia fornita dal generatore si propaga lungo di essa senza attenuazione, e viene trasferita integralmente ai capi del carico. Ciò indipendentemente dalla lunghezza della linea (almeno fino a che la resistenza ohmica rimane trascurabile). Anche l'impedenza caratteristica è indipendente dalla lunghezza della linea; essa determina, assieme alla tensione, la corrente che la percorre. Quest'ultima è eguale, come in un normale circuito, al rapporto tra la tensione e l'impedenza:

$$I = E : Z$$

Anche la potenza si calcola facilmente, secondo una delle espressioni:

$$P = I^2 Z; \quad P = E^2 : Z; \quad P = EI$$

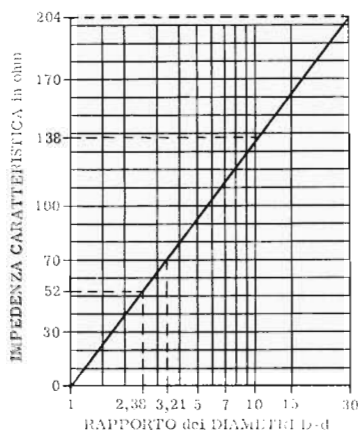



Fig. 11 - Grafico per il calcolo dell'impedenza caratteristica di una linea a quattro conduttori. L'impiego è analogo a quello di fig. 9, con la differenza che, come distanza, viene considerata la diagonale del quadrato, ossia il diametro del supporto isolante.

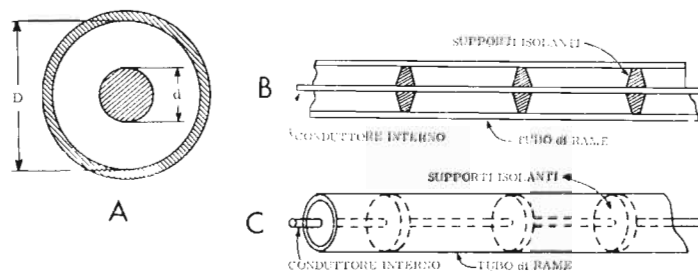



Fig. 12 - Struttura di un cavo coassiale. In A, sezione trasversale (perpendicolare all'asse), ingrandita per maggior chiarezza. In B, sezione longitudinale lungo l'asse del conduttore centrale. In C è infine rappresentato il cavo nel suo aspetto effettivo. Si noti la regolare distribuzione dei supporti isolanti tra il cavo e la calza interna.

Supponiamo ora che la resistenza R sia di valore diverso da quello dell'impedenza della linea. In tal caso il comportamento del circuito B (figura 7) viene influenzato dalla presenza di R, e ciò per la seguente ragione. Lungo la linea, la potenza si trasferisce secondo un determinato rapporto tensione/corrente, pari appunto all'impedenza caratteristica; la potenza che viene assorbita da R richiede invece un diverso rapporto tra E ed I, dato che R è diversa dall'impedenza della linea. Ne consegue che non tutta la potenza che la linea trasferisce nella resistenza viene effettivamente assorbita da quest'ultima. La potenza rimanente viene riflessa, e percorre la linea in senso inverso attraverso B, A, ecc., fino a tornare al generatore.

CARATTERISTICHE COSTRUTTIVE

Come già detto, le due principali categorie di linee di trasmissione sono il cavo coassiale e il cavo a conduttori paralleli. Tuttavia è possibile operare una seconda suddivisione, in relazione al mezzo sul quale i due conduttori si trovano immersi. Consideriamo, ad esempio, una linea costituita da due conduttori paralleli. La distanza tra i due conduttori è, come sappiamo, molto importante, e deve essere mantenuta costante lungo tutto la linea. Ciò si può ottenere con due diversi metodi:

1) Usando opportuni distanziatori, in materiale isolante, disposti ad una certa distanza fissa l'uno dall'altro. Per il resto, i conduttori rimangono immersi nell'aria. Queste linee si dicono con « isolamento ad aria ».

2) I conduttori possono, invece, essere completamente immersi in un isolante solido che li mantenga alla distanza voluta, e contemporaneamente li protegga da eventuali contatti accidentali con oggetti esterni. Si ottiene così quel tipo di linea di trasmissione, chiamato comunemente « piattina », simile — esternamente — ad un normale filo bipolare per impianti elettrici: essa viene denominata a « dielettrico solido ».

Linee con isolamento ad aria — Alla **figura 8**, vediamo come sia possibile ottenere una linea di trasmissione con isolamento ad aria, costituita da due conduttori paralleli. I due conduttori sono mantenuti a distanza costante uno dall'altro per mezzo di opportuni spaziatori isolanti in materiale plastico appropriato, quale ad esempio polistirene o « lucite ». Gli spaziatori devono trovarsi non molto distanti l'uno dall'altro, in modo che i due conduttori rimangano ben distesi, senza spostarsi dalla posizione stabilita, e ciò per evitare possibilità di variazioni nella capacità per unità di lunghezza. I valori dell'impedenza caratteristica che si ottengono con la linea di trasmissione ora esaminata sono dell'ordine dei 600 ohm.

L'impedenza caratteristica di questo tipo di linea si calcola mediante la formula:

$$Z = 276 \times \log \frac{d}{r}$$

nella quale Z è l'impedenza caratteristica, d è la distanza tra i due conduttori (o, meglio, tra i loro assi), ed r il raggio di un conduttore. Non hanno importanza le unità di misura in cui si esprimono d ed r, purchè esse siano eguali in entrambi i casi. Ciò poichè, ai fini della determinazione dell'impedenza, importano non i valori specifici di r e di d presi separatamente, ma il loro rapporto.

Per calcolare l'impedenza caratteristica occorre far uso, come si vede dalla formula precedente, delle tavole dei logaritmi. Alla **figura 9** vediamo alcuni diagrammi che consentono di ottenere, in modo molto semplice e senza alcun calcolo, l'impedenza caratteristica. Si cerca, sull'asse delle ascisse, il valore della distanza tra i due conduttori corrispondente al caso in esame, e successivamente, si traccia una verticale fino ad intersecare la linea inclinata che corrisponde al diametro dei conduttori. Da questa intersezione si traccia una retta orizzontale, e si legge, sull'asse delle ordinate, il valore dell'impedenza in ohm.

In certi casi, principalmente quando si vuole ottenere un'impedenza più bassa, si usano le linee a quattro fili; esse sono costituite da quattro conduttori disposti come se si trovassero ai vertici di un quadrato. Tale tipo di linea è illustrato, in sezione trasversale, alla **figura 10**. La spaziatura tra due fili adiacenti, corrispondente al lato del quadrato, è dello stesso ordine di quella delle linee bifilari. Si ottiene, tuttavia, una maggiore capacità distribuita, e quindi una minore impedenza caratteristica; ciò poichè i quattro fili vengono connessi in parallelo a due a due, unendo tra di loro, ai due estremi della linea, le due coppie di fili

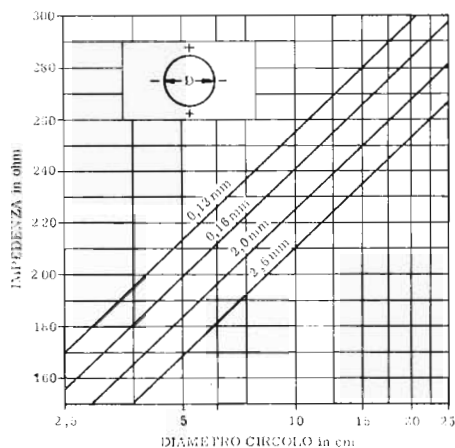



Fig. 13 - Grafico per il calcolo dell'impedenza caratteristica di una linea a cavo coassiale, in funzione del diametro interno del conduttore esterno (calza), e del diametro esterno del conduttore interno. Il valore di Z viene letto sull'asse verticale.

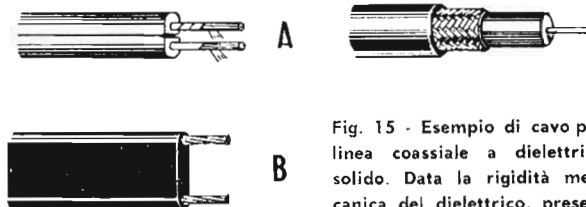



Fig. 14 - Esempi di piattine per linee bifilari. A, tipo da 300 ohm; B, tipo da 75 ohm. Si noti, tra i due tipi, la diversa distanza tra i due conduttori affiancati.

Fig. 15 - Esempio di cavo per linea coassiale a dielettrico solido. Data la rigidità meccanica del dielettrico, presenta il vantaggio, rispetto a quello ad aria, che il conduttore centrale può essere del tipo a treccia, flessibile, a vantaggio della conduttività dei segnali a radiofrequenza, per effetto pellicolare.

che si trovano ai vertici opposti del quadrato, ossia il conduttore 1 col conduttore 3 ed il 2 col 4.

Mediante l'impiego di linee a quattro conduttori si ottiene, oltre alla minore impedenza, anche una più bassa influenzabilità da parte di eventuali oggetti circostanti, ed in particolare della superficie terrestre. In pratica, per costruire tali tipi di linee, si usano supporti isolanti di forma circolare, e ciò per ragioni di maggiore solidità. I fili si trovano comunque disposti come se fossero ai quattro vertici di un quadrato.

L'impedenza di una linea a quattro fili si ottiene per mezzo dei grafici riportati alla **figura 11**. Il procedimento da seguirsi è lo stesso descritto nel caso delle linee bifilari. Si noti che, sul tratto delle ascisse, non è stata rappresentata la distanza tra due fili di polarità opposta, corrispondente al lato del quadrato, bensì quella tra due fili della stessa polarità, corrispondente alla diagonale del quadrato o, come si vede dalla figura stessa, al diametro dei supporti circolari. La formula per il calcolo dell'impedenza è la seguente:

$$Z = 138 \times \log \frac{d}{r} - 21 \text{ ohm}$$

dove d è la distanza tra i due conduttori adiacenti (lato del quadrato) ed r il raggio dei conduttori.

Volendo, pur con il sistema a quattro fili, ottenere un'impedenza leggermente superiore, si può ricorrere alla cosiddetta « doppia linea bifilare », la cui impedenza è data dall'espressione:

$$Z = 138 \times \log \frac{d}{r} + 21 \text{ ohm}$$

Come si vede, l'impedenza differisce dal caso precedente per il valore di 42 ohm, costante indipendentemente da tutte le altre caratteristiche della linea.

La doppia linea bifilare può essere rappresentata, in sezione trasversale, allo stesso modo di quella a quattro conduttori, ossia come alla figura 10. La differenza consiste nel diverso collegamento in parallelo tra i conduttori; questa volta si uniscono tra loro due conduttori adiacenti. Ad esempio, si potrebbero connettere tra di loro ai terminali, il conduttore 1 con il 2 ed il 3 col 4. Egualmente bene si potrebbe unire il 2 col 3 ed il 4 con l'1.

Consideriamo infine il caso del cavo coassiale con isolamento ad aria. In questo caso, data la difficoltà di mantenere una perfetta simmetria tra il conduttore interno e quello esterno (essi devono avere gli assi perfettamente coincidenti, d'onde appunto il nome di « cavi coassiali ») è necessario far uso di un gran numero di distanziatori, l'uno vicino all'altro; in ragione di ciò viene in parte a mancare la condizione secondo la quale, nelle linee con isolamento ad aria, i due conduttori devono essere immersi nel vuoto.

Alla **figura 12** si vede la struttura di un cavo coassiale: in A è rappresentata una sezione trasversale perpendicolare all'asse del cavo, in B una sezione trasversale passante per l'asse del cavo, ed in C una visione complessiva. L'impedenza caratteristica di un cavo coassiale si calcola secondo la formula:

$$Z = 138 \log \frac{D}{d}$$

In questo caso, D rappresenta il diametro interno del conduttore esterno e d il diametro esterno del conduttore interno. Inutile dire che questa formula vale solo fino a che i due conduttori sono perfettamente coassiali. Se, in conseguenza di uno spostamento nei supporti isolanti, il conduttore interno si sposta rispetto a quello esterno, le condizioni di lavoro della linea risultano completamente alterate.

Il fatto che, nei cavi coassiali, si renda necessaria la presenza di un maggiore numero di supporti isolanti, per sostenere la delicata struttura meccanica, comporta maggiori perdite di segnale, nonchè un'impedenza inferiore a quella prevista teoricamente mediante la formula precedente. Tuttavia, nonostante ciò, le linee di trasmissione a cavo coassiale presentano, fino a frequenze dell'ordine dei 100 MHz, minori perdite rispetto agli altri tipi precedentemente descritti. Alla **figura 13** è rappresentato un diagramma che consente — noti i diametri del conduttore interno e di quello esterno — di ottenere l'impedenza della linea. Si tratta, in sostanza, di calcolare il rapporto tra il diametro D ed il diametro d; successivamente si immagina di tracciare una verticale dal punto corrispondente sulla retta delle ascisse, fino ad incontrare la retta inclinata, e dal punto di intersezione si traccia una retta orizzontale che incontra l'asse delle ordinate indicando il valore delle impedenze.

Per quanto riguarda i due conduttori costituenti il

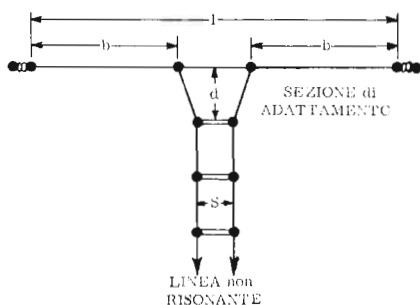



Fig. 16 - Adattamento a « delta » tra una linea bifilare e un dipolo. La linea termina ad una distanza critica dall'antenna, ed è collegata a due punti di questa, simmetrici rispetto al centro.

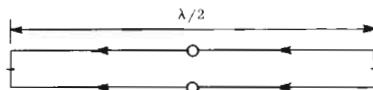



Fig. 17-A - Dipolo multifilare, costituito da diversi conduttori, uno dei quali è staccato dagli altri, pur essendo in contatto alle estremità. L'impedenza risultante è quadrupla di quella di un dipolo normale.

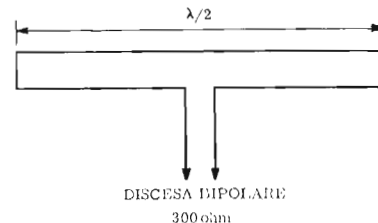



Fig. 17-B - Adattamento della linea di trasmissione ad un dipolo del tipo di figura 17-A. E' più semplice del tipo detto a « delta », ed è meno critico agli effetti del funzionamento e della stabilità.

cavo coassiale, solitamente quello più interno è costituito da un filo unico rigido, e quello più esterno da una calza, del tipo di quella normalmente presente nei cavi schermati. Perchè le perdite siano minime, occorre che l'aria presente all'interno del cavo contenga una bassa percentuale di umidità, e ciò si può ottenere sigillando, all'atto della fabbricazione, ogni possibile ingresso per l'aria dell'ambiente, con un apposito materiale impermeabile.

Linee a dielettrico solido — Nelle linee a dielettrico solido, i conduttori sono mantenuti nella posizione desiderata per mezzo della loro completa immersione in un dielettrico ad alto potere isolante ed a basse perdite, solitamente costituito da tipi particolari di materie plastiche. Pur presentando perdite leggermente superiori al tipo con isolamento ad aria, le linee a dielettrico solido sono, in genere, vantaggiose per la maggiore semplicità costruttiva e per la robustezza della loro struttura meccanica.

Le linee con isolamento ad aria devono, generalmente, essere realizzate sul posto, all'atto dell'installazione, dato che non è possibile piegarle nè sottoporle a forti sollecitazioni meccaniche. Quelle a dielettrico solido, invece, possono essere piegate a volontà, e sono perciò facilmente trasportabili ed adattabili ad ogni esigenza pratica. Esse presentano peraltro notevoli inconvenienti, tra i quali principalmente, oltre alla maggiore perdita, una più pronunciata influenzabilità da parte delle condizioni atmosferiche. Le variazioni di temperatura o di umidità dell'ambiente possono, ad esempio, provocare notevoli variazioni nelle proprietà del dielettrico: di conseguenza, la capacità per unità di lunghezza risulta alterata, provocando variazioni di impedenza. L'influenzabilità da parte degli agenti atmosferici può essere in buona parte eliminata ricoprendo le linee con sostanze impermeabili.

Anche nel caso delle linee a dielettrico solido, occorre distinguere tra tipi a linee bifilari, linee con quattro conduttori, ed a cavo coassiale. Le linee bifilari a dielettrico solido sono le più usate in ricezione, specialmente per il collegamento dell'antenna all'entrata dei ricevitori FM e televisivi. Alla **figura 14** sono rappresentati due diversi tipi di linea bifilare (piattina) di uso corrente: in A si vede una linea a 300 ohm ed in B una a 75 ohm. Quest'ultima è adatta per il collegamento ai dipoli a mezza onda che, ci è noto, presentano un'impedenza d'entrata di circa 73 ohm.

Un tipo di cavo coassiale a dielettrico solido è rappresentato alla **figura 15**. Questa volta, dato che i conduttori vengono tenuti a posto dal dielettrico, è possibile usare anche all'interno un conduttore a treccia, che presenta il vantaggio di una migliore conduzione dei segnali ad Alta Frequenza. Mentre nel caso delle linee bifilari sono correntemente usati, secondo le necessità, entrambi i tipi, ad aria ed a dielettrico solido, nel caso del cavo coassiale si usa quasi sempre il tipo a dielettrico solido, sia per la scarsa robustezza di quello ad aria, sia per il vantaggio derivante dal conduttore interno in treccia multifilare.

I cavi coassiali a dielettrico solido sono reperibili nelle impedenze principali di 50 ohm e 75 ohm. L'impedenza di un cavo coassiale a dielettrico solido si può facilmente calcolare, quando sia nota la costante dielettrica del dielettrico usato. E' sufficiente determinare l'impedenza di un cavo coassiale costituito da conduttori del medesimo diametro, ma immersi nell'aria; ciò si può eseguire facilmente mediante il diagramma di figura 13. Successivamente si divide il valore ottenuto per il termine $\sqrt{k}$. In esso, k rappresenta la costante dielettrica, ed è quindi, per qualunque tipo di materiale, maggiore di 1; ne segue che l'impedenza caratteristica dei cavi coassiali a dielettrico solido è, in ogni caso, minore della corrispondente con isolamento ad aria.

ACCOPPIAMENTO con le ANTENNE

Per quanto riguarda il collegamento trasmettitore-antenna, le linee di trasmissione adottate con maggiore frequenza sono la piattina da 300 ohm, la linea bifilare con isolamento ad aria, da circa 500 ohm, ed il cavo coassiale, da circa 50 ohm. Da quanto detto in precedenza, risulta che, nel caso in cui l'impedenza di ingresso dell'antenna sia totalmente resistiva, e pari a quella della linea, in quest'ultima non si formano onde stazionarie. Ciò perchè l'energia fluisce esclusivamente nella direzione dal trasmettitore verso l'antenna, senza subire alcuna riflessione.

Quando, invece, all'estremo di uscita della linea di trasmissione, ossia al punto in cui questa è collegata all'antenna, si verifica una riflessione parziale, si formano lungo la linea delle onde stazionarie di ampiezza

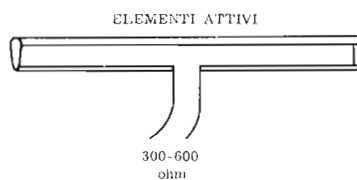



Fig. 18-A - Dipolo nel quale il conduttore superiore ha un diametro maggiore di quello inferiore. L'impedenza risultante è ancora maggiore rispetto a un dipolo normale, e dipende dal rapporto tra i due diametri dei conduttori.

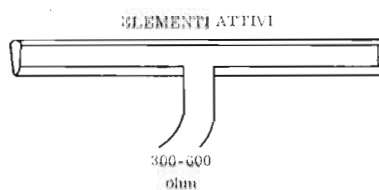



Fig. 18-B - Caso opposto al precedente. Il conduttore superiore ha un diametro minore di quello inferiore. L'impedenza risultante è minore del quadruplo di quella di un dipolo normale.

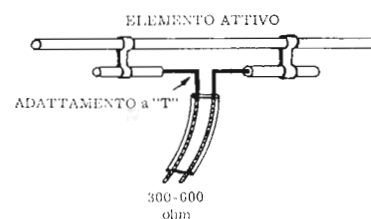



Fig. 19 - Adattamento a « T », analogo a quello di un dipolo bifilare. Si ha, in questo caso, una differenza tra le lunghezze dei due tratti. L'adattamento di impedenza viene perfezionato variando la posizione dei due morsetti di collegamento.

proporzionale alla percentuale di riflessione. Tale riflessione può essere determinata da due circostanze:

1) da un disadattamento di impedenza tra la linea di trasmissione e l'antenna;

2) dal fatto che l'impedenza di ingresso dell'antenna sia, in parte, reattiva. Ciò corrisponde ad un'antenna fuori risonanza, e determina un riflessione di energia, proporzionale al valore della componente reattiva.

Naturalmente, in entrambi i casi, non si verificherà mai una riflessione totale, e quindi non si avranno dei nodi in cui la tensione assume valore nullo, nè dei ventri in cui essa si raddoppia rispetto al valore fornito dal trasmettitore. Tuttavia, misurando la tensione lungo la linea, si possono trovare, in questi casi, dei massimi e dei minimi ben pronunciati.

Linee non accordate. — Come sappiamo, le linee di trasmissione non accordate sono quelle in cui si fa in modo di evitare onde stazionarie, ossia riflessione di energia verso il trasmettitore. Vediamo come sia possibile il verificarsi di tali circostanze, in dipendenza del tipo di collegamento tra la linea e l'antenna. I più comuni tipi di collegamento o, meglio, di *adattamento* sono a « delta », per « dipoli multifilari » e a « T ».

Consideriamo dapprima l'**adattamento a « delta »**, illustrato alla **figura 16**. Come si può notare, la linea di trasmissione è una normale linea bifilare con isolamento ad aria, fino ad una distanza *d* dall'antenna. A questo punto, i due conduttori cominciano ad allontanarsi l'uno dall'altro, formando un andamento ad Y. Ciò comporta una graduale diminuzione della capacità distribuita, e quindi un corrispondente aumento dell'impedenza. I due terminali della « Y » vanno collegati all'antenna in punti, simmetrici rispetto al punto centrale, corrispondenti ad impedenza intermedia tra l'impedenza normale della linea e quella che essa assume ai suoi terminali ad Y (che è, come abbiamo detto, maggiore).

Questo adattamento è molto critico, ed i valori di *l* (lunghezza dell'antenna), di *d*, e di *b* devono essere accuratamente calcolati, in base alle seguenti espressioni, che dipendono dalla frequenza di trasmissione:

$$l = 140{,}2 : F; \quad b = 53 : F; \quad d = 45 : F$$

nelle quali F è la frequenza in MHz; tutte le misure risultano espresse in metri. Basta una differenza anche lieve per determinare riflessione, con conseguenti onde stazionarie nella linea di trasmissione.

Un **dipolo multifilare** è una normale antenna a dipolo, costituita da più conduttori avvicinati o intrecciati. L'impedenza di un dipolo multifilare, fino a che tutti i conduttori che lo costituiscono sono strettamente a contatto in ogni punto della sua lunghezza, è solo di poco superiore a quella di un dipolo a conduttore unico. Se, invece, si stacca totalmente un conduttore dai rimanenti, salvo che nei punti estremi, si ottiene un'antenna del tipo di **figura 17-A**. Questo particolare tipo di multifilare ha un'impedenza pari al quadruplo del tipo normale. Perciò nel caso del dipolo a mezza onda, l'impedenza di ingresso sale da 75 a 300 ohm.

L'adattamento di un dipolo multifilare del tipo ora descritto si ottiene mediante la disposizione di figura 17-**B**. Esso è, come si vede, più semplice di quella a « delta » precedentemente descritta, dato che non è necessario alcun calcolo per ottenere i punti di collegamento, nè alcuna modifica nell'ultima parte della linea. Si ha, inoltre, un secondo vantaggio: l'impedenza dell'antenna non è più invariabile, ma può essere modificata a piacere, in base al seguente procedimento.

Se i due conduttori, superiore ed inferiore, che costituiscono il dipolo in questione, sono dello stesso diametro, l'impedenza è effettivamente il quadruplo di quella del dipolo semplice. Se invece il tratto superiore ha un diametro maggiore di quello inferiore, come si vede alla **figura 18-A**, si ottiene un'impedenza superiore. Essa dipende, comunque, dal rapporto tra i due diametri. Nel caso opposto, ossia quando il tratto superiore ha un diametro minore di quello inferiore, come nella figura 18-**B**, si ottiene un'impedenza inferiore a quella al quadruplo del dipolo normale.

Consideriamo, infine, il caso dell'**adattamento a T**. Si tratta (**figura 19**) di un adattamento simile a quello del dipolo bifilare, salvo che il tratto inferiore è più corto di quello superiore. Esso dà risultati migliori di quelli del dipolo bifilare con frequenze fino a 30 MHz; per frequenze superiori è preferibile quest'ultimo.

I due conduttori di adattamento (costituenti il tratto inferiore), vengono collegati al tratto superiore mediante due morsetti. La posizione dei morsetti può essere variata, e ciò permette di regolare l'adattamento, in dipendenza della frequenza del segnale di ingresso, si da ottenere le migliori condizioni (massima irradiazione e minima riflessione).

DOMANDE sulle LEZIONI 121ª e 122ª

N. 1 —
Cosa si intende per « antenna »? Quale è il suo compito specifico nei confronti di un ricevitore o di un trasmettitore?

N. 2 —
Da quali fattori dipende l'intensità del campo elettromagnetico irradiato da un'antenna nello spazio circostante?

N. 3 —
In quale caso un'antenna viene percorsa da una corrente avente la massima intensità possibile?

N. 4 —
Quali sono i casi in cui si ha, da parte di un'antenna, la massima irradiazione di energia a radiofrequenza?

N. 5 —
Nell'analisi del comportamento di un'antenna nei confronti della tensione e della corrente del segnale, cosa si intende per « ventre » e « nodo »?

N. 6 —
In quale modo viene comunemente definito il « rapporto onde stazionarie » (« R.O.S. »)?

N. 7 —
Per quale motivo un'antenna calcolata in base alla lunghezza d'onda, deve avere una lunghezza effettiva leggermente inferiore al valore calcolato, ossia inferiore ad un multiplo della metà della stessa lunghezza d'onda?

N. 8 —
Cosa è un dipolo?

N. 9 —
Cosa si intende per impedenza di un'antenna? Può questo valore essere considerato un valore assoluto?

N. 10 —
In quale modo può essere definita la resistenza di irradiazione di un'antenna?

N. 11 —
Cos'è, ed a cosa serve, un diagramma di irradiazione?

N. 12 —
Cosa si intende per « antenna isotropica »?

N. 13 —
Cosa è una linea di trasmissione ?

N. 14 —
In quale modo è possibile evitare l'irradiazione di energia a radiofrequenza, da parte di una linea di trasmissione?

N. 15 —
Quanti tipi di cavi si usano per le linee di trasmissione? Come vengono — a loro volta — suddivisi?

N. 16 —
Cosa si intende per « impedenza caratteristica » di una linea di trasmissione?

RISPOSTE alle DOMANDE di Pag. 953

N. 1 — La percezione contemporanea di suoni provenienti da diverse direzioni, con possibilità di individuare la direzione di provenienza.
N. 2 — Inviando a due diversi amplificatori i segnali provenienti da due microfoni separati, posti ciascuno in corrispondenza di un lato della sorgente sonora (orchestra).
N. 3 — Su un disco « stereo », o su un nastro avente un minimo di due tracce disponibili contemporaneamente.
N. 4 — Allineate, ossia in modo che i relativi traferri giacciano sulla medesima perpendicolare all'asse longitudinale del nastro.
N. 5 — Nella registrazione dei due canali in un unico solco, con un angolo di 90° tra loro. In altre parole, entrambi sono inclinati di 45°, in senso opposto, rispetto alla perpendicolare alla superficie del disco.
N. 6 — Per l'equa distribuzione tra i due canali delle inevitabili distorsioni, e per la buona eliminazione dei disturbi dovuta alla granulosità del materiale.
N. 7 — La reciproca influenza tra i due canali di un complesso « stereo ». Quando esiste tra essi il fenomeno dell'intermodulazione.
N. 8 — Sul fatto che i segnali possono essere prelevati separatamente tra le due coppie di lati del cristallo, corrispondenti alle due facce perpendicolari agli assi di vibrazione.
N. 9 — Quando i segnali magnetizzanti di una delle due tracce riescono ad estendersi, sia pure in minima parte, fino a raggiungere la traccia dell'altro canale.
N. 10 — A ripartire equamente i due segnali tra i canali, fino ad ottenere un buon equilibrio tra le due potenze sonore, tale cioè da dare una riproduzione gradevole e bilanciata.
N. 11 — Ad adattare l'impedenza di ingresso a quella del cristallo di una testina piezoelettrica. In pratica, costituisce il carico ai cui capi è presente la tensione di segnale.
N. 12 — In corrispondenza del terminale libero del potenziometro. In tal caso, il condensatore da 50.000 pF connesso in serie al cursore non può fugare a massa i segnali a frequenza elevata, in quanto la resistenza del potenziometro è tutta inclusa in serie alla stessa capacità.
N. 13 — Per consentire la regolazione della polarizzazione di base, onde stabilire il punto di funzionamento sulla curva caratteristica di ciascun transistore.
N. 14 — Due: uno tra l'emettitore del terzo stadio e la base del secondo, ed uno tra il terminale blu di uscita e la base dello stadio pilota.
N. 15 — Si avrebbe sempre una distorsione. Nel primo caso, per il carico che sarebbe eccessivo, e nel secondo per il carico insufficiente. In entrambi i casi verrebbero alterate le condizioni ideali di funzionamento.
N. 16 — Per evitare che le forti variazioni di corrente, che si manifestano nel circuito dello stadio finale, provochino variazioni nella tensione di alimentazione degli stadi precedenti.

DIAGRAMMI di IRRADIAZIONE

A complemento di quanto detto in precedenza sui diagrammi di irradiazione delle antenne, riportiamo una serie di grafici che chiariranno ulteriormente tale importante argomento. La prima serie di figure comprende i diagrammi di irradiazione propri di antenne di varie lunghezze. tutte multiple di mezza lunghezza d'onda del segnale trasmesso.

I numeri segnati lungo i lati del quadrato indicano gli angoli di irradiazione cui sono riferiti i singoli raggi che. partendo dal centro della figura, raggiungono i lati del quadrato. La distanza tra il centro ed il punto in cui ognuno dei detti raggi interseca la curva in neretto (curva di irradiazione) è proporzionale all'intensità dell'irradiazione nella direzione stessa.

Il segmento orizzontale delimitato dalle frecce. denominato « asse del conduttore ». non rappresenta il conduttore che costituisce l'antenna. *bensì la sola sua direzione*. Si deve infatti immaginare che il conduttore sia molto corto, tutto concentrato al centro del diagramma. Come sappiamo, i veri e propri diagrammi di irradiazione dovrebbero essere delle figure solide a tre dimensioni. Tuttavia. data l'impossibilità di rappresentare con precisione tale tipo di figure su un foglio piano. si considerano le intersezioni di esse con piani caratteristici, di solito passanti per l'asse del conduttore.

Nel caso delle figure della prima serie. si tratta di diagrammi di irradiazione relativi ad antenne che si immaginano nello spazio libero, ossia infinitamente distanti da qualunque corpo solido. In conseguenza di ciò. la figura tridimensionale è simmetrica, e si ottiene mediante una semplice rotazione delle figure qui rappresentate attorno all'asse del conduttore. Da ciò deriva che dette figure si possono ottenere intersecando il diagramma tridimensionale con un piano qualunque che contenga il conduttore. indipendentemente dal suo orientamento effettivo.

Se l'antenna si trova nelle vicinanze di corpi solidi. la simmetria di cui si è detto viene a mancare. e nei diagrammi di irradiazione relativi occorre specificare l'orientamento del piano di intersezione che si considera. In generale. dato che le antenne si trovano nelle vicinanze della superficie terrestre. è questa che apporta le principali modifiche alle figure di irradiazione. Risulta pertanto utile considerare quelle corrispondenti alle intersezioni con il piano verticale ed il piano orizzontale. In casi particolari. o per uno studio più approfondito, si considerano anche intersezioni con piani di inclinazione intermedia. Tutte le serie di figure successive alla prima illustrano le condizioni che si ottengono per effetto della presenza della superficie terrestre.

DIAGRAMMI di IRRADIAZIONE nello SPAZIO LIBERO

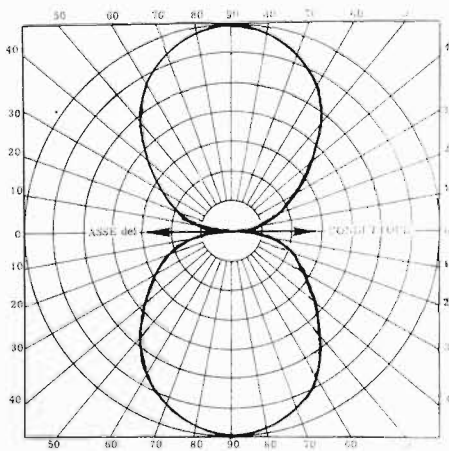



Diagramma direttivo piano di una antenna di lunghezza pari a $\lambda/2$.

Diagramma direttivo di un'antenna di lunghezza pari a 1,5 λ, sul piano nel quale giace l'asse del conduttore.

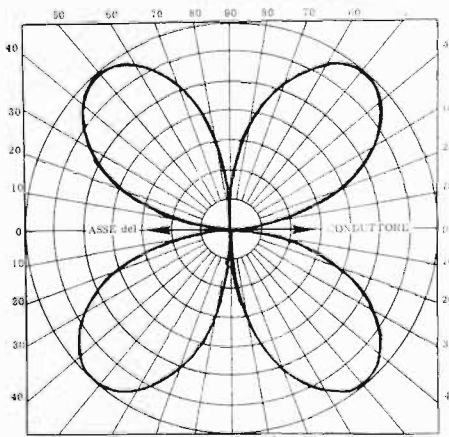
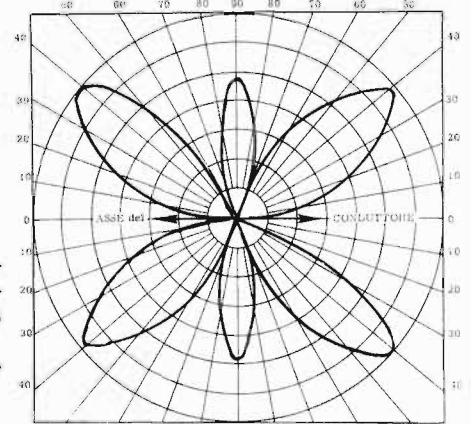
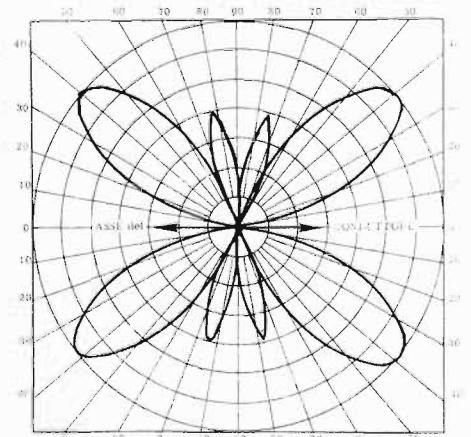
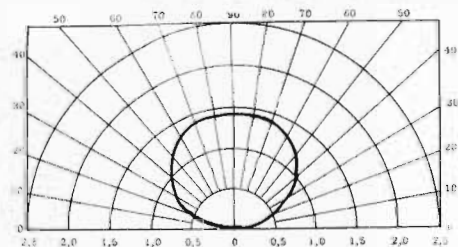
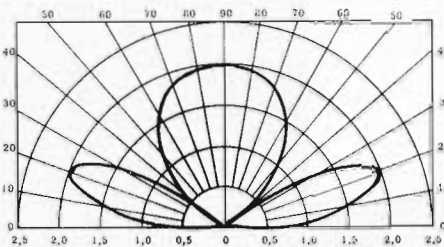
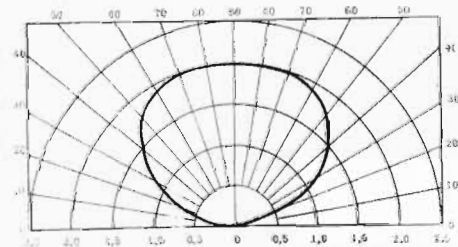



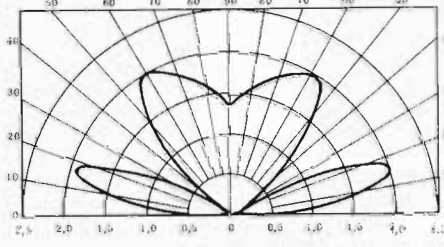
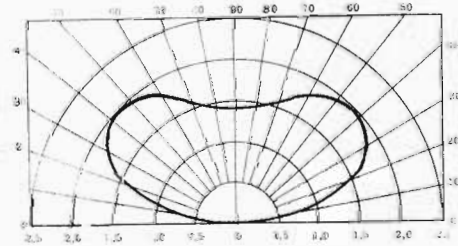
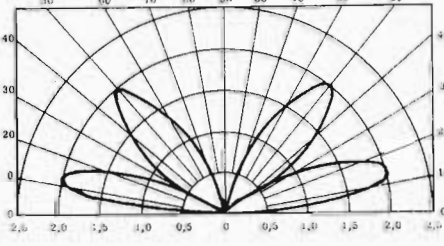
Diagramma direttivo nello spazio libero, di un'antenna di lunghezza pari a λ, sul piano nel quale giace l'asse del conduttore.

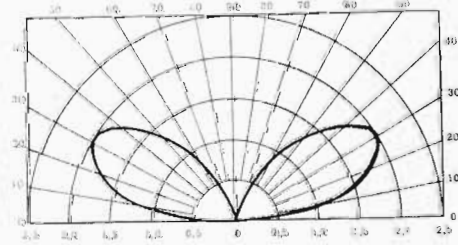
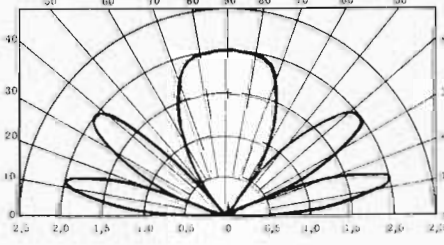
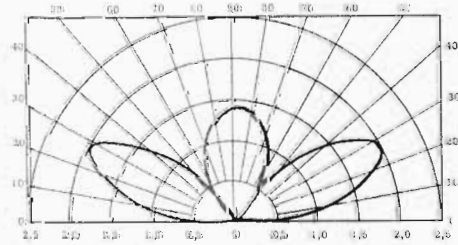
Diagramma direttivo di un'antenna di lunghezza pari a 2 λ, nel piano nel quale giace l'asse del conduttore.

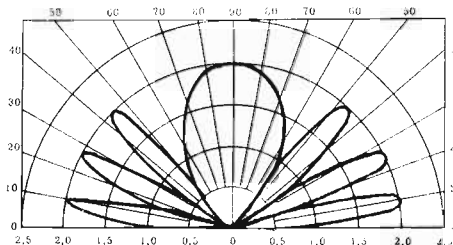
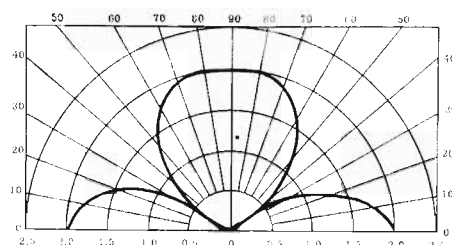
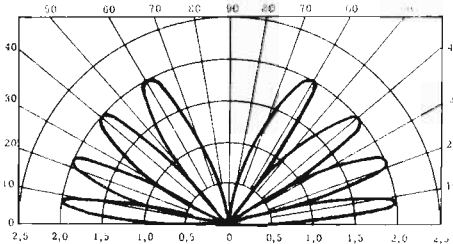
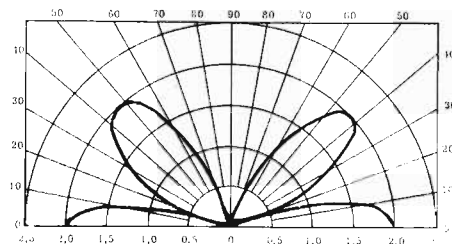
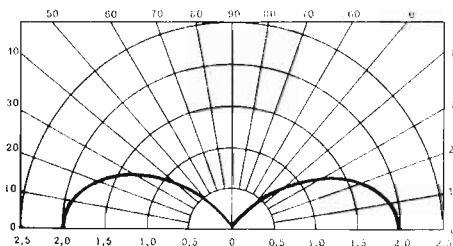
FATTORI di MOLTIPLICAZIONE dell'INTENSITA' di IRRADIAZIONE

Le figure di queste serie non rappresentano dei diagrammi di irradiazione. Esse sono utili per ottenere **dei fattori** per i quali si devono moltiplicare le intensità di irradiazione, relative al piano di intersezione verticale, onde tenere conto dell'effetto della superficie terrestre.

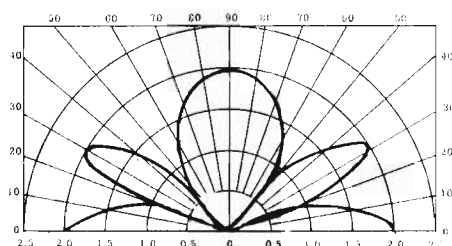
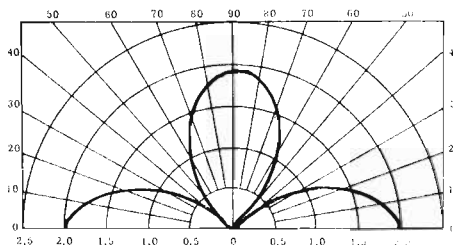
Come sappiamo, la superficie terrestre si comporta come un riflettore, ed invia verso l'alto le onde che l'antenna irradia verso di essa. Tali onde assumono quindi direzioni già occupate da quelle irradiate direttamente dall'antenna, e si sommano a queste. A seconda delle diverse altezze dell'antenna rispetto al suolo, in alcune direzioni le onde si trovano in fase e si rinforzano l'una con l'altra, mentre in altre si elidono, in maggiore o minore misura, a seconda dell'angolo di fase.

I casi più significativi sono quelli che corrispondono ad altezze dell'antenna — rispetto alla superficie terrestre — multiple di 1/8 della lunghezza d'onda del segnale trasmesso, e sono appunto questi che noi consideriamo nella serie di figure. I fattori di moltiplicazione, relativi ad ogni direzione nel piano verticale passante per il conduttore che costituisce l'antenna, si ottengono come nel caso delle figure precedenti: si considera il raggio relativo alla direzione presa in esame e lo si interseca con la curva disegnata in neretto: la distanza tra questo punto ed il centro indica il fattore di moltiplicazione. Tale distanza può essere letta nel lato inferiore del rettangolo, in corrispondenza delle diverse semicirconferenze.

Antenne orizzontali poste ad una altezza dal suolo pari a 1/8 di λ.

Antenne orizzontali poste ad una altezza dal suolo pari a 3/4 di λ.

Antenne orizzontali poste ad una altezza dal suolo pari a 1/4 di λ.

Antenne orizzontali poste ad una altezza dal suolo pari a 7/8 di λ.

Antenne orizzontali poste ad una altezza dal suolo pari a 3/8 di λ.

Antenne orizzontali poste ad una altezza dal suolo pari a λ.

Antenne orizzontali poste ad una altezza dal suolo pari a 1/2 di λ.

Antenne orizzontali poste ad una altezza dal suolo pari a 1,25 λ.

Antenne orizzontali poste ad una altezza dal suolo pari a 5/8 di λ.

Antenne orizzontali poste ad una altezza dal suolo pari a 1,5 λ.

Antenne orizzontali poste ad una altezza dal suolo pari a 1,75 λ.

Dipolo verticale col centro ad una altezza dal suolo pari a 1/2 di λ.

Antenne orizzontali poste ad una altezza dal suolo pari a 2 λ.

Dipolo verticale col centro ad una altezza dal suolo pari a 3/4 di λ.

Dipolo verticale col centro ad una altezza dal suolo pari a 1/4 di λ.

Dipolo verticale col centro ad una altezza dal suolo pari a λ.

Dipolo verticale col centro ad una altezza dal suolo pari a 3/8 di λ.

Dipolo verticale col centro ad una altezza dal suolo pari a 1,5 λ.

DIAGRAMMI di DIRETTIVITA'

Per calcolare la « direttività » delle antenne, è spesso necessario considerare le intensità di irradiazione corrispondenti a direzioni intermedie tra quelle del piano verticale e quelle del piano orizzontale. A questo scopo riportiamo le figure della 3ª serie, che indicano le intersezioni dei diagrammi di irradiazione tridimensionali, con piani inclinati rispetto a quello orizzontale.

Vengono considerati gli angoli più caratteristici, ossia quelli di 9°, 15° e 30° rispetto all'orizzontale. Come si può notare, ad esempio, nella prima figura della serie, l'intensità di irradiazione, considerando questi piani direttivi, non si annulla mai in corrispondenza di angoli di irradiazione di 0°. Ciò avviene, invece, nelle figure della prima e della seconda serie.

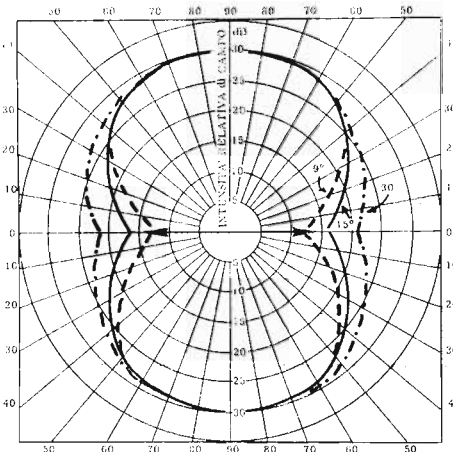
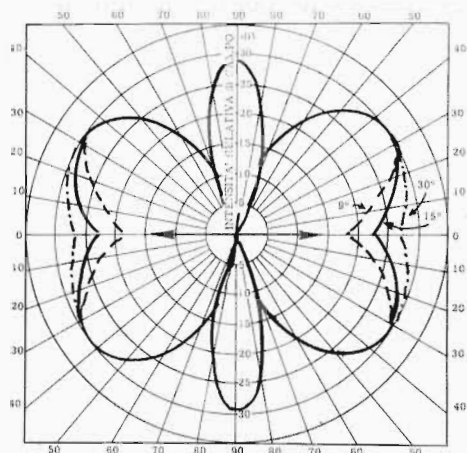
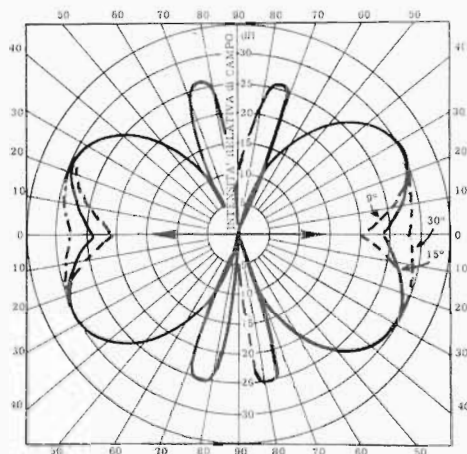
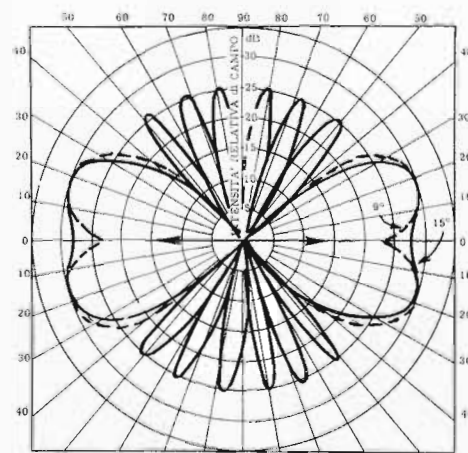
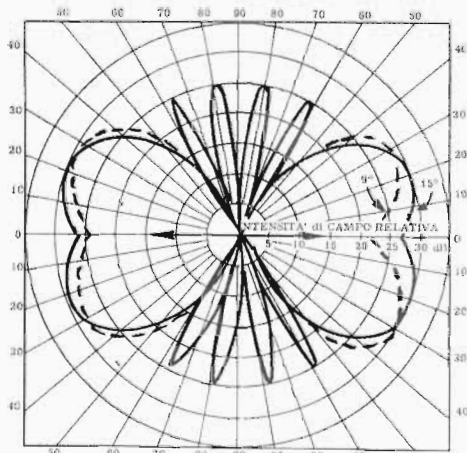
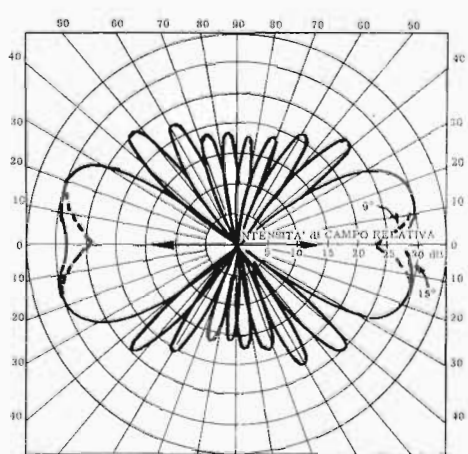
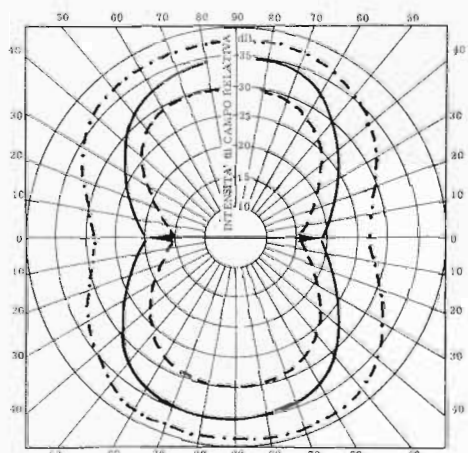



Diagramma direttivo di un'antenna orizzontale a mezza onda, relativo a tre angoli di irradiazione (9°, 15° e 30°).

Antenne orizzontali di lunghezza pari a λ, con angoli verticali di 9°, 15°, e 30°.

Antenne orizzontali di lunghezza pari a 1,5 λ, con angoli verticali di 9°, 15°, e 30°.

Antenne orizzontali di lunghezza pari a 4 λ, con angoli verticali di 9° e 15°.

Antenne orizzontali di lunghezza pari a 2 λ, con angoli verticali di 9°, 15°, e 30°.

Antenne orizzontali di lunghezza pari a 5 λ, con angoli verticali di 9° e 15°.

Antenne orizzontali di lunghezza pari a 3 λ, con angoli verticali di 9° e 15°.

Confronto tra le ampiezze di irradiazione con angoli di 9°, 15° e 30°, con antenne orizzontali a mezza onda, poste ad un'altezza dal suolo pari a ½ di λ.

DIAGRAMMI di IRRADIAZIONE su PIANI VERTICALI

Le figure della quarta serie indicano i diagrammi di irradiazione relativi a piani verticali, contenenti il conduttore, oppure perpendicolari ad esso. Si è tenuto conto anche dell'effetto di riflessione della superficie terrestre, e quindi dell'altezza dell'antenna dal suolo.

In questi diagrammi si suppone che la terra sia perfettamente conduttrice, e che l'antenna sia disposta orizzontalmente.

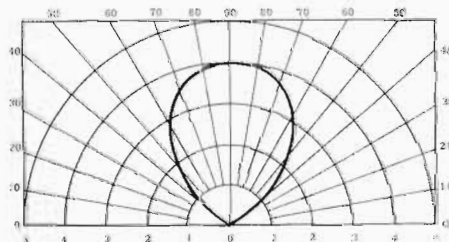



Diagramma in direzione del conduttore, con altezza dal suolo pari a ¼ λ.

Diagramma a 90° rispetto al conduttore; altezza dal suolo pari a ¼ di λ.

Diagramma in direzione del conduttore; altezza dal suolo pari a ½ di λ.

Diagramma a 90° rispetto al conduttore; altezza dal suolo pari a ½ di λ.

Diagramma in direzione del conduttore; altezza dal suolo pari a ¾ di λ.

Diagramma a 90° rispetto al conduttore; altezza dal suolo pari a ¾ di λ.

Diagramma in direzione del conduttore; altezza dal suolo pari a λ.

Diagramma a 90° rispetto al conduttore; altezza dal suolo pari a λ.

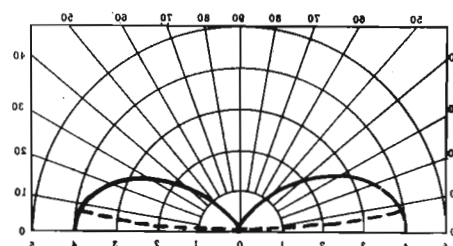
Diagramma in direzione del conduttore; altezza dal suolo pari a 1,25 λ.

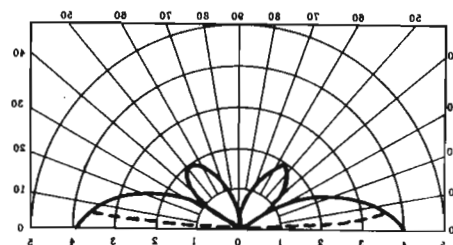
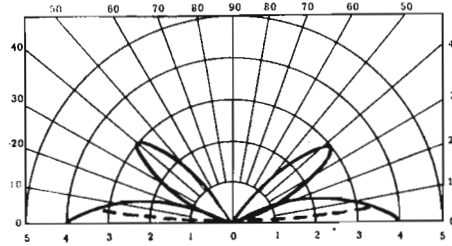
Diagramma a 90° rispetto al conduttore; altezza dal suolo pari a 1,25 λ.

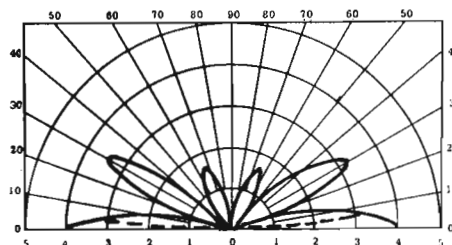
Diagramma in direzione del conduttore; altezza dal suolo pari a 1,5 λ.

Diagramma a 90° rispetto al conduttore; altezza dal suolo pari a 1,5 λ.

ANTENNE VERTICALI

Queste figure sono del tutto analoghe alle precedenti, ma sono state ottenute con antenne verticali.

Altezza dal suolo pari a ¼ di λ.

Altezza dal suolo pari a ½ di λ.

Altezza dal suolo pari a ¾ di λ.

Altezza dal suolo pari a λ.

L'AMPLIFICATORE STEREOFONICO

SM/1111

offre una soluzione completa ed economica per la riproduzione sia dei segnali normali che di quelli stereo.

Le caratteristiche lo classificano nella serie degli amplificatori di Alta Fedeltà: può fornire 10 watt complessivi (5 watt per ogni canale). Sensibilità di 20 e 30 e 50 mV a tre distinte entrate.

descritto dettagliatamente alla lezione 120ª

FORNITO COME SCATOLA DI MONTAGGIO

Rivolgetevi alle Sedi G B C oppure direttamente alla Sede centrale: Via Petrella, 6 - MILANO

Chiedete all'edicola questo nuovo Numero

RADIO e TELEVISIONE
N. 101
la nitida voce del progresso
SCOTCH Magnetic Tape
MINNESOTA

Se siete interessati alla televisione, alla radiotecnica, all'elettronica applicata, è nel Vostro reale tornaconto seguire questa rassegna che, mensilmente, con i suoi numerosi articoli, Vi consente un aggiornamento completo con la costante evoluzione della tecnica e del mercato.

ABBONATEVI !

Abbonamento per 12 Numeri. . . . . lire 3.060.
Per gli abbonati al "Corso di Radiotecnica" . . . . solo lire 2.754.

Abbonamento: "RADIO e TELEVISIONE" - via dei Pellegrini N. 8/4, conto corrente postale: 3/4545 - Milano

Una copia, alle edicole, lire 300

L'abbonamento non ha riferimento all'anno solare e vi da sempre diritto a ricevere 12 Numeri: inoltre, vi invieremo 4 fascicoli in omaggio, da voi scelti tra quelli disponibili, anteriori al N. 97.

Se non disponete del N. 98 potete farlo includere nell'abbonamento.

MANTENETEVI AGGIORNATI CON LA TECNICA RADIO - TV LEGGENDO ASSIDUAMENTE «RADIO e TELEVISIONE»